

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE MADRID

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR



**Grado en Ingeniería de tecnologías y servicios de
telecomunicación.**

TRABAJO FIN DE GRADO

Análisis, construcción y mejora de un drone de competición.

**Jaime Eduardo Aragón López
Tutor: Fernando Jesús López Colino**

Julio de 2017

Análisis, construcción y mejora de un drone de competición.

AUTOR: Jaime Eduardo Aragón López

TUTOR: Fernando Jesús López Colino

HCTLab

Dpto. Tecnología Electrónica y de las Comunicaciones

Escuela Politécnica Superior

Universidad Autónoma de Madrid

Julio de 2017

Resumen

Hoy en día, el mundo de los drones está en auge y se plantean nuevas aplicaciones para los mismos. Una de las aéreas que más está creciendo es la de los drones de competición. En estas competiciones, los pilotos controlan la aeronave en primera persona a través de unas gafas de realidad virtual gracias a una cámara instalada en el aparato.

En la actualidad los deportes y la tecnología mueven cientos de millones de euros al año. Estas competiciones son una apuesta muy fuerte en países como Estados Unidos, donde el deporte está creciendo con una velocidad abrumadora. En este país ya existen numerosos campeonatos que son televisados.

Una de las mayores ventajas de este deporte es que el espectador puede disfrutar exactamente de la misma sensación que el piloto, ya que se televisan las imágenes de las cámaras de los drones. Además los espectadores que disfruten del evento insitu tienen una capacidad de interacción muy grande; pueden sintonizar las aeronaves de los distintos pilotos que estén en el aire en ese momento, cambiando los canales de sus propias gafas o pantallas. Estas competiciones aún no están muy extendidas en España, aunque ya desde el año pasado empiezan a surgir los primeros eventos que se celebran en nuestro país.

La construcción y ajuste de un drone de estas características no es una tarea sencilla. Implica la cuidadosa selección de cada uno de los componentes, la fase de montaje y la programación y ajuste de todos los parámetros del mismo. En este trabajo abordaremos en detalle cada una de las etapas anteriormente mencionadas; problemas e incompatibilidades que puedan surgir, con sus respectivas soluciones, posibles mejoras a implementar sobre un primer prototipo y el estudio más en profundidad de algunos de los componentes. En particular el análisis del sistema PID de la controladora de vuelo y las diferentes antenas existentes para la transmisión y recepción de video.

Palabras clave

Drone, FPV, Cuadricoptero, Multirrotor, PID, Pagoda, Betaflight, Cleanflight, Blackbox, Blheli, oneshot, multishot, Dshot.

Abstract

Nowadays, the world of drones is growing very quickly and there are new applications for them every day. One of the areas that is growing the most is the competition drones. In these competitions, pilots control the aircraft with the transmitter, while they watch in first person view the video from the copter (through a virtual reality glasses).

Nowadays sports and technology move hundreds of millions of euros a year. These competitions are a very strong bet in countries like United States, where the sport is growing with an overwhelming speed. In this country, there are already a lot of championships that are televised.

One of the biggest advantages of this sport is that the viewer can enjoy the same experience as the pilot, as the images from the cameras of the drones are televised. In addition, the spectators who enjoy the event in person, have a great capacity of interaction. They can syntonize the video of any pilot that is flying at that moment, changing the channels of their own glasses or screens. These competitions are not yet very widespread in Spain, but in the last year the first events that take place in our country begin to emerge.

The construction and adjustment of a drone of these characteristics is not a simple task. It implies the careful selection of each one of the components, the assembly phase and the programming and adjustment of all the parameters of it. In this work, we will discuss in detail each one of the stages mentioned above; problems and incompatibilities that may arise, with their respective solutions, possible improvements to implement on a first prototype and the more in-depth study of some of the components. Focusing on the analysis of the PID system of the flight controller and the different antennas existing for the transmission and reception of video.

Keywords

Drone, FPV, Quadcopter, Multirrotor, PID, Pagoda, Betaflight, Cleanflight, Blackbox, Blheli, onsehot, multishot, Dshot.

Agradecimientos

En primer lugar, quisiera dar las gracias a mi tutor, Fernando Jesús López Colino, por confiar en mí aceptando esta propuesta de proyecto, y por toda la ayuda que me ha prestado en el desarrollo del trabajo.

Dar las gracias también a Storm¹, mi patrocinador, por brindarme esta gran oportunidad y haber confiado en mí como piloto de pruebas² (Crazy PIDs³) durante todo este año. Gracias por haber proporcionado gran parte del material para la construcción del drone, sin el cual este proyecto no habría sido posible.

Quiero dar las gracias también a mis compañeros y amigos de FPV Madrid y toda la gente que he conocido en las diferentes quedadas y competiciones de drones por promover este deporte.

También dar las gracias a todos los compañeros, amigos y profesores que me han acompañado durante todos estos años de universidad, que han hecho de ellos unos años para recordar.

Y por supuesto a mi pareja y a toda mi familia, por haberme apoyado desde el principio, y haberme soportado hablando de drones día y noche durante años.

¹<http://www.helipal.com/>

²https://www.instagram.com/crazy_pids/

³<https://www.youtube.com/channel/UCAgHJYB4pZN6naDkmUaroQw>

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 MOTIVACIÓN	2
1.2 OBJETIVOS.....	2
1.3 ORGANIZACIÓN DE LA MEMORIA	3
2 ESTADO DEL ARTE	5
3 ANÁLISIS DE LOS COMPONENTES BÁSICOS DEL CUADRICÓPTERO	7
3.1 CONTROLADORA DE VUELO	7
3.1.1 Firmwares	8
3.1.2 Componentes de las controladoras.....	9
3.2 VARIADORES ELECTRÓNICOS (ESC).....	11
3.2.1 Protocolos de comunicación Controladora-Variador	11
3.3 RECEPTOR	13
3.3.1 Protocolos de comunicación receptor-controladora.....	14
3.4 OTROS COMPONENTES.....	15
3.4.1 Transmisor	15
3.4.2 Estructura.....	15
3.4.3 Motores.....	17
3.4.4 Batería.....	18
4 COMPONENTES PARA EL VUELO EN PRIMERA PERSONA (FPV)	19
4.1 CÁMARA	20
4.2 TRANSMISOR DE VIDEO	21
4.3 ANTENA.....	22
4.3.1 Antenas Pagoda	22
4.4 RECEPTOR	24
5 ELECCIÓN DE COMPONENTES Y MONTAJE	25
6 INTEGRACIÓN, PRUEBAS Y RESULTADOS	31
6.1 CONFIGURACIÓN DE LOS VARIADORES Y LA CÁMARA DE FPV.....	31
6.2 CONFIGURACIÓN DE LA CONTROLADORA DE VUELO, BETAFLIGHT	31
6.2.1 PIDs	34
6.2.2 Blackbox	35
7 CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.....	39
7.1 CONCLUSIONES.....	39
7.2 TRABAJO FUTURO	39
8 REFERENCIAS	41
GLOSARIO	43
ANEXO 1. HÉLICES	A
ANEXO 2. OSD.....	B
ANEXO3. GAFAS Y PANTALLA.....	C
ANEXO 4. TAMAÑO MOTORES BRUSHLESS.....	D

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. NUMERACIÓN Y SENTIDO DE GIRO DE LOS MOTORES.	7
FIGURA 2. RELACIÓN ENTRE LOS CANALES Y LOS EJES.	7
FIGURA 3. PROCESADORES F1, F3 Y F4 DE LA FAMILIA STM32.	10
FIGURA 4. COMPARACIÓN ONESHOT125 CON PWM.	12
FIGURA 5. COMPARATIVA DE VELOCIDAD DE PROTOCOLOS DE VARIADORES ELECTRÓNICOS (HZ).	13
FIGURA 6. CANALES DEL TRANSMISOR (MODULO 2).	15
FIGURA 7. COMPARATIVA LOKI S5 CON UNA ESTRUCTURA COMÚN.	16
FIGURA 8. LOKI S5 PITCH Y ROLL. (13)	17
FIGURA 9. COMPARATIVA DE LA SUPERFICIE DE LA ESTRUCTURA.	17
FIGURA 10. BANDAS Y FRECUENCIAS.	21
FIGURA 11. MODELO DE SIMULACIÓN ANTENA PAGODA, MEJOR Y PEOR CASO DEL DIAGRAMA DE RADIACIÓN.	23
FIGURA 12. MODELO DE SIMULACIÓN DE REFERENCIA, ANTENA DE 4 LÓBULOS (CLOVERLEAF), MEJOR Y PEOR CASO DEL DIAGRAMA DE RADIACIÓN.	23
FIGURA 13. PARÁMETRO S11 DE TRES ANTENAS PAGODAS.	24
FIGURA 14. ESQUEMA DIVERSITY.	24
FIGURA 15. VISTA DEL VARIADOR ELECTRÓNICO AIKON 30 A.	26
FIGURA 16. MOTOR STORM 2205 2350 KV.	26
FIGURA 17. CONEXIÓN Y CABLEADO DE LOS COMPONENTES DEL DRONE.	27
FIGURA 18. ESQUEMA ENSAMBLAJE ANTENA PAGODA.	28
FIGURA 19. COMPONENTES PARA CONSTRUIR LAS ANTENAS PAGODA.	28
FIGURA 20. CONSTRUCCIÓN ANTENA PAGODA.	29
FIGURA 21. ANTENAS PAGODA CON CARCASAS PROTECTORAS IMPRESAS EN 3D.	29
FIGURA 22. DRONE.	29
FIGURA 23. DRONE TERMINADO, DETALLE ANTENAS DEL RECEPTOR ALINEADAS 90º ENTRE SÍ.	30
FIGURA 24. BLHELISUIT.	31
FIGURA 25. BETAFLIGHT, PUERTOS.	32
FIGURA 26. BETAFLIGHT, CONFIGURACIÓN (1).	32
FIGURA 27. BETAFLIGHT, CONFIGURACIÓN (2).	32
FIGURA 28. BETAFLIGHT, RECEPTOR.	33
FIGURA 29. BETAFLIGHT, MODOS.	33
FIGURA 30. BETAFLIGHT, PIDS.	34
FIGURA 31. ESQUEMA CONTROLADOR PID.	34
FIGURA 32. BLACKBOX, MOTORES TRASEROS MÁS REVOLUCIONADOS QUE LOS MOTORES DELANTEROS.	36
FIGURA 33. BLACKBOX, MOTORES CON REVOLUCIONES SIMILARES.	36
FIGURA 34. BLACKBOX, P DEMASIADO ALTA.	37
FIGURA 35. BLACKBOX, P ADECUADA.	38

FIGURA 36. BLACKBOX, D (GRÁFICA AMARILLA) DEMASIADO BAJA. 38

FIGURA 37. BLACKBOX, D ADECUADA..... 38

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. VELOCIDADES Y NÚMERO DE UARTS EN LAS CONTROLADORAS CON DIFERENTES PROCESADORES.	10
---	----

1 Introducción

Para empezar es necesario señalar que hay mucha controversia en cuanto a cómo nombrar a algunos vehículos aéreos no tripulados: drone, UAV, RPA y multicoptero son palabras con las que medios de comunicación, expertos y la gente de a pie identifica a los aviones y helicópteros no tripulados. Aunque se suelen utilizar de forma indistinta no significan lo mismo.

Drone y UAV (Unmanned Aerial Vehicle), vehículo aéreo no tripulado (o VANT por sus siglas en español) son sinónimos y se refieren a vehículos aéreos no tripulados, incluyendo todo tipo de multicopteros, helicópteros, y aviones.

El término RPA (Remotely Piloted Aircraft) se trata de un concepto que surgió con fuerza en EEUU para evitar que la gente se atemorice por el uso de estos ingenios en medios urbanos pensando que no hay ninguna persona que evite un desastre en caso de avería en vuelo. Es importante saber que todos los RPAs son drones, ya que son vehículos aéreos no tripulados, pero no todos los drones son RPAs, ya que para ello deben estar controlados por una persona. Por otro lado, el término multicoptero engloba concretamente aquellos drones que son helicópteros formados por varios rotores orientados verticalmente (1).

En la actualidad los drones tienen diferentes funciones, desde propuestas comerciales hasta el rescate de personas. Hay funciones totalmente desarrolladas e inmersas en la sociedad y otras tantas que están en fase de experimentación. Estas son algunas de las aplicaciones relacionadas con drones:

- Drones de competición. Los eventos de carreras de drones están creciendo de forma exponencial. Son pequeños cuadricópteros equipados con cámaras y pilotos recibiendo la imagen a tiempo real en unas gafas de realidad virtual. Estos pequeños cuadricópteros con un peso menor a 700 g pueden alcanzar velocidades de más de 150 km/h pero con una autonomía de tan solo unos pocos minutos.
- Filmación aérea. Esta es probablemente una de las áreas más desarrolladas en la actualidad. Su uso implica que se han abaratado en gran medida los costes al sustituir el tradicional helicóptero tripulado para grabar tomas aéreas en cualquier ámbito. La retransmisión de diferentes eventos deportivos, en el cine, o cualquier toma aérea de una ciudad o monumento, pueden realizarse con un drone de filmación aérea.
- Drones militares. Drone armados que al no llevar piloto humano tampoco necesitan los equipos asociados (tales como cabina, blindaje, asiento eyectable, controles de vuelo, y los controles ambientales de la presión y oxígeno), lo que deviene en un menor peso y tamaño que una aeronave tripulada. Esto permite conseguir mayor carga útil, alcance y maniobrabilidad, además está favorecida por no tener que respetar el límite fisiológico impuesto por el piloto.
- Repartidor. En Rusia e Israel los drones ya se encuentran haciendo envíos de pizza. En china, la empresa de correo SF Express hace envíos a través de pequeños cuadricópteros (2).
- En situaciones de emergencia. Su labor es facilitar la localización de víctimas. Los drones destacan por su efectividad en situaciones límites, especialmente en áreas que quedaron aisladas o de difícil acceso.

- Búsqueda de personas. La posibilidad de volar a poca altura junto con una cámara de alta calidad, que transmite en tiempo real, permite el reconocimiento inmediato de personas perdidas en bosques o montañas (3).
- Vigilancia fronteriza. España comenzará a utilizarlos a través de la Guardia Civil, para controlar los ingresos marítimos.
- Control de incendios forestales. En España se crearon los primeros drones especialmente diseñados para la prevención y el control de incendios forestales.

Este trabajo se va a focalizar en los cuadricópteros de carreras, aunque a partir de ahora nos referiremos a ellos como drones de carreras.

1.1 Motivación

Como se ha expuesto en la introducción los drones tienen numerosas aplicaciones sólidas que podrían facilitar la vida a las personas y a un coste relativamente bajo. Por eso mismo se está invirtiendo tanto dinero en desarrollo e investigación en tecnología relacionada con estos aparatos.

Por otro lado, en cuanto a los drones de carreras como deporte, además de que el deporte por si solo se puede ver como una inversión sólida (debido a las ganancias por la cantidad de espectadores), en este tipo de deporte que va de la mano de la tecnología la inversión es más factible, puesto que muchos de los avances que se hagan gracias a éste podrán después implementarse en drones con otras aplicaciones.

Un ejemplo muy similar es el de la Fórmula1 (F1), por si sola mueve millones de euros ya que tiene muchos seguidores y espectadores, genera empleo, publicidad etc. Pero además de que los grandes inversores, como podrían ser las marcas de coches, ganan dinero invirtiendo este deporte, los avances que se desarrollan en la F1 se aplican después en el sector de los automóviles comerciales.

Por eso creemos que en un mundo en el que la tecnología y el deporte mueven millones de euros al año, y en el que las aplicaciones de los drones no paran de crecer, las carreras de drones como deporte mediático podría alcanzar niveles de audiencia cercanos a los de la F1 en menos de una década.

1.2 Objetivos

Los objetivos de este trabajo abarcan desde el análisis exhaustivo de cada uno de los componentes que conforman un drone de competición hasta la fase de montaje y ajuste del mismo. También se revisará el proceso de construcción de nuestras propias antenas de polarización circular y el análisis en más profundidad del sistema PID.

Se pretende analizar todos y cada uno de los componentes que conforman el drone de carreras, evaluando las diferentes opciones que existen en el mercado, así como los diferentes protocolos para comunicar los componentes del drone entre sí. Se observará cómo ha sido la evolución de estos protocolos y el impacto que esta evolución tiene principalmente en la latencia de los sistemas.

Se detallará el proceso de montaje y el cableado del drone, así como la construcción de nuestras propias antenas de polarización circular omnidireccionales impresas en PCB que

tienen (entre otras ventajas) un ratio axial mayor. Se explicará porque el ratio axial es un factor tan importante en este campo.

Por último, se ajustarán todos los parámetros necesarios para el primer vuelo del dron y se analizará cómo funciona el sistema PID. Además, se analizará como una nueva herramienta llamada *Blackbox* (caja negra) facilita en gran medida la tarea del ajuste de estos parámetros.

1.3 Organización de la memoria

La memoria consta de los siguientes capítulos:

- Capítulo 1: Introducción. Introducción sobre los drones y las diferentes aplicaciones que tienen en el mundo actual, motivación y objetivos del proyecto.
- Capítulo 2: Estado del Arte. Explicación sobre el estado de las carreras de drones y los diferentes organizadores y ligas que existen en la actualidad, así como la proyección de éstas.
- Capítulo 3: Análisis de los componentes básicos del cuadricóptero. Presentación y análisis de los componentes más importantes del dron. Se hará hincapié en los protocolos de comunicación que existen entre estos componentes y la importancia de minimizar la latencia.
- Capítulo 4: Componentes para el vuelo en primera persona (FPV). Presentación y análisis de los componentes necesarios para la transmisión del video a tiempo real. Se analizará en profundidad la elección de la frecuencia de video y las antenas.
- Capítulo 5: Elección de componentes y montaje. Se detallará la elección de componentes concretos que se han utilizado y por qué, así como el proceso de montaje del dron y de las antenas Pagoda.
- Capítulo 6: Integración, pruebas y resultados. En esta sección se abordarán los procesos de configuración del dron, principalmente en lo referente a la controladora de vuelo y el ajuste de los PIDs. Se utilizará una herramienta llamada *Blackbox* que facilitará el ajuste de estos parámetros.
- Capítulo 7: Conclusiones y trabajo futuro. Presentación de las conclusiones extraídas y las futuras líneas de trabajo que se plantean.

2 Estado del arte

Las primeras carreras de drones surgieron como simple entretenimiento en algunas regiones de los Estados Unidos y Europa en 2013, pero desde 2015, se han convertido en verdaderos espectáculos que agotan entradas en minutos y saturan servidores debido a que todos quieren ver el evento vía streaming. Algunos de los eventos más importantes son la DRL⁴ (Drone Racing League) y la DCL⁵ (Drone Champions League) que se televisan en cadenas deportivas. Estos eventos tienen unos equipos de pilotos profesionales cerrados y no puede participar cualquiera. Por otro lado, ERSA⁶ (European Rotor Sport Association) organiza eventos por toda Europa en los que cualquiera puede participar y los cuatro mejores pilotos de cada evento se clasifican después para la final europea de cada año. Existe también una comunidad llamada MultiGP⁷ que es muy famosa y reconocida en EEUU, se trata de una organización que permite crear un grupo de MultiGP para organizar carreras, suben planos de circuitos estandarizados que se pueden recrear a lo largo de todo el mundo para que pilotos de todas partes del planeta puedan competir unos contra otros cronometrando sus vueltas. Además, MultiGP cuenta con una interfaz Web muy consistente que facilita a los organizadores tanto la asignación de frecuencias y como la asignación de tandas de vuelos de pilotos. FPV Madrid⁸ es un club de aeromodelismo (del que soy socio fundador) que además de ser el grupo MultiGP más importante de España, organiza carreras constantemente llegando a repartir hasta 3000€ en premios entre sus participantes.

La tecnología relacionada con estos aparatos está en constante evolución, de hecho desde el comienzo de este trabajo hasta la fecha de finalización del mismo ha habido numerosos avances significativos tanto en el hardware como en el software de sus componentes. Se presentarán estos avances en la selección de componentes para la construcción del aparato.

Antes de explicar cada uno de los componentes que conforma un drone, y la selección de componentes que se ha hecho para la construcción del drone de carreras, es importante remarcar que esta selección de componentes debe estar completamente ligada al uso que se le vaya a dar y las necesidades que se tengan. Es decir, si se desea tener las mayores prestaciones posibles probablemente se deba elegir una estructura muy ligera, sacrificando durabilidad y resistencia, o por ejemplo unos motores muy potentes, pero poco eficientes sacrificando tiempo de vuelo. En este proyecto se han escogido unos componentes que permitan que el drone tenga unas prestaciones bastante altas, pero con una buena durabilidad y un tiempo de vuelo aceptable para un drone de estas características. Además, es importante saber que todos los componentes están relacionados unos con otros y que las prestaciones finales dependen de la interacción de todos los componentes, luego la elección de cada uno de ellos condiciona la del resto.

⁴<https://thedroneracingleague.com/>

⁵<https://dcl.aero/>

⁶<http://ersa.eu.com/>

⁷<http://www.multigp.com/>

⁸<https://www.facebook.com/fpvmadrid/>

3 Análisis de los componentes básicos del cuadricóptero

En esta sección se van a analizar los componentes del cuadricóptero radiocontrol, es decir los componentes esenciales para que el drone pueda volar. Dentro de esta categoría están: la estructura, los motores, los variadores electrónicos, las hélices, la controladora de vuelo, la batería, el receptor y el mando o transmisor.

Se va a analizar con más detalle la controladora de vuelo, los variadores electrónicos y el receptor. Ya que son los componentes más importantes y también los que más han evolucionado recientemente. Se observarán los diferentes protocolos de comunicación entre estos componentes y cuáles de ellos tienen mayores ventajas. Un aspecto muy importante en la elección de estos componentes y sus protocolos es la latencia de los mismos. Posteriormente se analizarán el resto de componentes del drone.

3.1 Controladora de vuelo

Uno de los elementos más importantes de un drone es la controladora de vuelo, la controladora de vuelo se encarga de recopilar y gestionar los datos que recibe de los sensores y del receptor, posteriormente realiza ciertos cálculos en lazo PID y envía datos a cada uno de los variadores electrónicos (que se analizarán más adelante) indicando la velocidad que debe tener cada motor.

Normalmente los drones de carreras suelen ser cuadricópteros en X y los motores del mismo se designan conforme a la Figura 1.

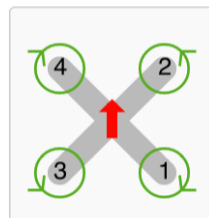


Figura 1. Numeración y sentido de giro de los motores.

Por lo tanto si nosotros queremos avanzar inclinaremos hacia delante el *stick* derecho (que controla el eje del pitch como se puede observar en la Figura 2) esa señal viajará hasta el receptor y éste enviará esa señal a la controladora de vuelo, que mandará los datos correspondientes a los variadores electrónicos haciendo que los motores uno y tres giren más que los motores cuatro y dos inclinando el drone hacia delante permitiendo que empiece a avanzar.

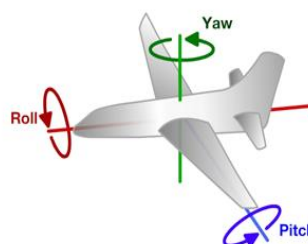


Figura 2. Relación entre los canales y los ejes.

Las controladoras de vuelo pueden tener una gran variedad de sensores, pero la mayoría de ellos no son necesarios en drones de carreras. El sensor indispensable es el giróscopo que permite a la controladora de vuelo conocer la inclinación del dron en cada instante.

3.1.1 Firmwares

Desde que los drones de carreras salieron a la luz han existido diferentes firmwares para las controladoras de vuelo, estos son los más importantes:

- Baseflight⁹ fue uno de los primeros firmware FC de 32 bits ampliamente utilizado basado en el firmware del controlador de vuelo Multiwii¹⁰ de 8 bits. Hoy en día Baseflight no se actualiza y está totalmente obsoleto. Pero a pesar de ello y de toda la controversia que rodea al autor del software, Time Cop, el creador de Baseflight, ayudó a crear algunos de los mejores firmwares para controladoras de vuelo de hoy en día (4).
- Cleanflight¹¹ es una variante de Baseflight creada para facilitar el mantenimiento y desarrollo futuro del código. Rápidamente se convirtió en un software de control de vuelo ampliamente utilizado y confiable.
- Betaflight¹² es una variante de Cleanflight que se centra en el desarrollo de nuevas características y rendimiento de vuelo disponible para drones de carreras, de ahí el nombre de Betaflight. Hoy en día, éste es probablemente el software de control de vuelo más utilizado y por buenas razones. Soporta un rango muy amplio de controladoras de vuelo, la configuración que trae por defecto es lo suficientemente buena para volar sin problemas en la mayoría de los casos, algo impensable con firmwares anteriores. Es decir los valores de los PIDs que tiene asignados por defecto permiten volar sin grandes vibraciones, sobrecalentamiento de motores u otros problemas en la mayoría de los casos, esto es gracias al aumento del *looptime* (gracias a mejores procesadores y sobre todo a la optimización del código), la implementación de filtros más sofisticados y una investigación más en profundidad sobre los PIDs. Por eso Betaflight consigue que con una sola configuración de PIDs se pueda volar de forma aceptable un mayor número de drones diferentes, o lo que es lo mismo que un dron vuele de forma aceptable con un rango de configuraciones de PIDs mayor. Además, Betaflight está lleno de características para pilotos de carreras, pilotos de *acro / freestyle* y principiantes por igual. Sigue siendo *open-source*, y los usuarios más experimentados hacen buenas contribuciones por lo que hay muchos desarrolladores mejorando Betaflight continuamente y generando actualizaciones de forma regular.
- Raceflight¹³ es una variante de Betaflight/Cleanflight que se centra aún más en los drones de carreras o de *freestyle* y además está orientado concretamente hacia las controladoras de vuelo F4. Desde su creación, Raceflight cambió a desarrollo de código cerrado y después de cierta controversia los desarrolladores lanzaron Raceflight One con su controladora de vuelo Revolt¹⁴ y afirman que en la actualidad está libre de cualquier código abierto. Raceflight es famoso por su suavidad, pero su rango de opciones de controladoras de vuelo es muy pequeño (5).

⁹<https://github.com/multiwii/baseflight>

¹⁰<http://www.multiwii.com/>

¹¹<http://cleanflight.com/>

¹²<https://github.com/betaflight/betaflight/releases>

¹³<https://raceflight.net/>

¹⁴<https://raceflight.net/product/raceflight-flight-controller/>

- KISS¹⁵ (KeepIt Super Simple) Intenta mantenerlo todo muy simple de cara al usuario. KISS fue desarrollado por Flyduino, que ha estado haciendo componentes de multirrotor desde 2011. Es un firmware cerrado (fuente cerrada) y algo dependiente de la interfaz de hardware (muy similar a los productos de Apple). El software KISS se actualiza constantemente, aunque el desarrollo de código cerrado es más lento que open-source. La GUI de KISS es mucho más simplificada en comparación con la interfaz gráfica de usuario de Betaflight o Cleanflight, proporcionando uno de los procesos más rápidos de configuración. Pero debido a la falta de opciones en su GUI a veces el ajuste del drone puede ser más difícil en configuraciones problemáticas (como motores mal balanceados y con muchas vibraciones). Es una opción muy sólida tanto para controladoras de vuelo como para variadores electrónicos, aunque es algo más cara (6).

Además, una característica importante de algunas controladoras de vuelo es la opción de configurar Blackbox, que es una caja negra que nos permite conocer el comportamiento del drone al volar y la interacción de los PIDs, lo cual es muy útil a la hora de calibrar estos parámetros. Para guardar estos datos existen diferentes opciones, desde conectar a la controladora de vuelo un lector de tarjetas micro SD, pasando por controladoras que ya lo llevan integrado, hasta otras que disponen de un espacio de memoria donde se puede almacenar unos cuantos minutos de vuelo, suficientes para grabar los datos de vuelo y poder analizarlos para calibrar mejor los PIDs.

3.1.2 Componentes de las controladoras

Dos de los componentes más importantes de las controladoras de vuelo son el giróscopo y el procesador.

Las primeras controladoras de vuelo que se fabricaron para drones de carreras llevaban integrado un giróscopo denominado 6050. Posteriormente según se fueron modernizando estas controladoras empezaron a fabricarse numerosas placas con un modelo más moderno de giroscopio el modelo 6500. Es más rápido que su predecesor, pero el problema es que después de investigar y de una gran interacción por parte de la comunidad de drones se ha observado que este giróscopo más moderno es más sensible al ruido. Por lo que en concreto cuando los variadores tenían activada la función "*Damped light*" que se explicará en la sección de variadores electrónicos, se producía ruido que afectaba en gran medida al giróscopo. En este trabajo se han usado algunas placas con ese giróscopo y es cierto que en algunas ocasiones montando la controladora de vuelo sobre gomas de silicona las vibraciones detectadas por el giróscopo desaparecen, incluso teniendo activado el *damped light* en los variadores. En cualquier caso, yo personalmente no escogería ninguna placa con el giroscopio 6500, para evitar problemas.

Al elegir controladora de vuelo, se pueden encontrar placas con diferentes tipos de procesadores: F1, F3 y F4 como se puede apreciar en la Figura 3. Estas son las tres series de procesador STM32¹⁶ más usados en controladoras de vuelo. Este procesador STM32 es el cerebro de la controladora de vuelo, casi como la CPU en un ordenador. Hay actualmente 10 series en la familia de STM32, de mayor a menor capacidad son H7, F7, F4, F3, F2, F1, F0, L4, L1, L0.

¹⁵<http://kiss.flyduino.net/>

¹⁶<https://en.wikipedia.org/wiki/STM32>

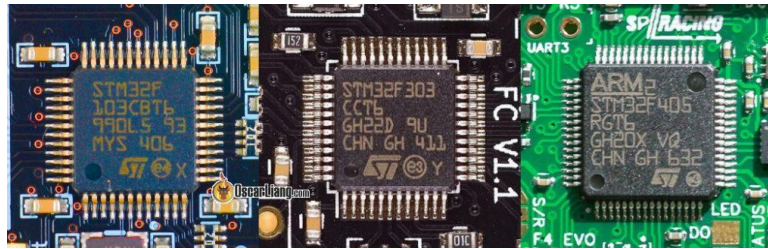


Figura 3. Procesadores F1, F3 y F4 de la familia STM32.

La primera controladora de vuelo de 32 bits para drones de carreras fue la CC3D¹⁷ con el procesador F1. Pero ese procesador ya está obsoleto y no se fabrican nuevas placas con procesador F1. La mayoría de controladoras del mercado en la actualidad llevan un procesador F3 o F4. A día de hoy prácticamente no existen controladoras con procesador F7 pero llegarán pronto.

Las F3 tienen una velocidad de reloj parecida a las F1, pero las F3 puede realizar cálculos en coma flotante mucho más rápido debido a que tienen una unidad dedicada a estos cálculos (FPU). En la Figura 3 se puede apreciar que las controladoras con procesador F1 disponen de 2 puertos UART pero la realidad es que sólo hay uno útil ya que el otro se dedica al puerto USB por el que estas placas se conectan al ordenador. No es éste el caso de las F3 que tienen su propio puerto dedicado para USB. Los puertos UART de las F3 tienen un inversor, a diferencia de las F1 en las que no se podía conectar directamente el receptor por protocolos digitales como SBUS (se explicarán este tipo de protocolos en la sección 3.3.1).

La diferencia principal entre las F4 y las F3 es que las F4 tienen una velocidad de procesamiento mucho mayor, 168 MHz frente a 72 MHz de F3, como se puede observar en la Tabla 1 (7).

Processor	Processor Speed	no. of UART on FC
F1	72MHz	2
F3	72MHz	3
F4	168MHz	3
F7	216MHz	8

Tabla 1. Velocidades y número de UARTs en las controladoras con diferentes procesadores.

A la hora de elegir una controladora de vuelo, además de tener en cuenta el software que se desea utilizar y el procesador que se va a escoger también es necesario mirar otras características. Por ejemplo, las primeras controladoras de vuelo que surgieron para drones de carreras sólo hacían de controladoras por lo que aparte se necesitaba una PDB (*Power Distribution Board*) donde soldar los cables de alimentación de los variadores.

Existen algunos casos en los que la integración de componentes ha llegado al punto de que en una controladora de vuelo se concentran además un gran número de componentes desde controladoras de vuelo que hacen de PDB hasta controladoras de vuelo que tienen integrado el transmisor de video o incluso los cuatro variadores electrónicos. Esto tiene sus ventajas y sus inconvenientes, por un lado a mayor grado de integración se ahorrara más

¹⁷<http://www.dronetrest.com/t/cc3d-flight-controller-guide/830>

peso y más espacio, pero por otro lado en el caso de que un componente falle será necesario cambiar toda la placa.

3.2 Variadores electrónicos (ESC)

El variador electrónico o ESC por sus siglas (*Electronic Speed Contoller*) es un controlador de velocidad electrónico. Un sistema capaz de definir la velocidad de giro de un motor *brushless* mediante la generación de pulsos compatibles con este tipo de motores.

El tamaño de un ESC varía mucho dependiendo de si tiene BEC (más grande) o si no lo tiene (más pequeño). Las siglas BEC significan "*Battery Elimination Circuit*", o Circuito de eliminación de batería; es básicamente un regulador de voltaje, que transforma el voltaje de la batería a 5 V para alimentar el receptor, la controladora de vuelo, etc.

Desde el inicio de los drones de carreras han surgido diferentes firmwares de control para estos variadores. Puesto que los componentes que se utilizan vienen del aeromodelismo en el que los cambios de velocidad en los motores no son tan bruscos y no necesitaban ser tan precisos los firmwares de estos variadores orientados al aeromodelismo en general eran bastante lentos. Con la llegada de los drones y concretamente los drones de carreras fue necesario la creación de un nuevo software más rápido.

El primer firmware para los variadores especialmente diseñado para drones fue SimonK¹⁸ e incluso estando diseñado especialmente para drones se reportaron numerosos problemas de desincronización con este firmware y ocasionaba muchos quebraderos de cabeza por eso hoy en día está ya obsoleto y ha sido reemplazado prácticamente en su totalidad por BLHeli¹⁹.

BLHeli (o Blheli_S, su nueva versión) es actualmente el firmware más extendido en los drones de carreras ya que funciona realmente bien. Desde su origen este firmware ha evolucionado mucho.

3.2.1 Protocolos de comunicación Controladora-Variador

El primer protocolo de comunicación que lanzó BLHeli fue Oneshoot (Oneshot125) y es el modo que dio a conocer a este firmware. Oneshot125²⁰ es un protocolo de comunicación que permite que ambos se comuniquen mucho más rápido (125-250us), que los protocolos de comunicación PWM que existían hasta el momento. Por este motivo los motores también reaccionaban más rápido y esto mejoraba mucho el rendimiento.

Se va a detallar el funcionamiento de oneshoot125 conforme a la Figura 4. Mientras el drone vuela, la controladora de vuelo lee datos del sensor y calcula la acción deseada, esto se conoce como el *control loop*. Este proceso se repite de forma muy rápida. Cuando se usan variadores con PWM conectados a la controladora, el variador tiene su propio *loop time* en el que lee el dato de la controladora y envía la señal correspondiente a los motores. El problema está en que los *loops* de los variadores y de la controladora no tienen porqué coincidir. Puede darse el caso en el que en el momento de ciclo del variador en el que se lee el dato de la controladora, ese dato no se haya actualizado aún y se esté enviando el dato anterior.

¹⁸<https://cdn.hackaday.io/files/253281083633152/lynxmotion-simonk-esc-guide.pdf>

¹⁹<https://github.com/bitdump/BLHeli>

²⁰<https://github.com/TauLabs/TauLabs/wiki/User-Guide:-OneShot125>

Oneshoot125 se sincroniza con la controladora de vuelo lo que significa que en el momento en el que la controladora complete su ciclo de reloj el variador leerá el dato inmediatamente.

Posteriormente surgieron otros protocolos, Oneshot42²¹ que se basa en los mismos principios que oneshot125 pero es tres veces más rápido (42-84 us) y Multishot²² que es aún más rápido (5-25 us). (8)

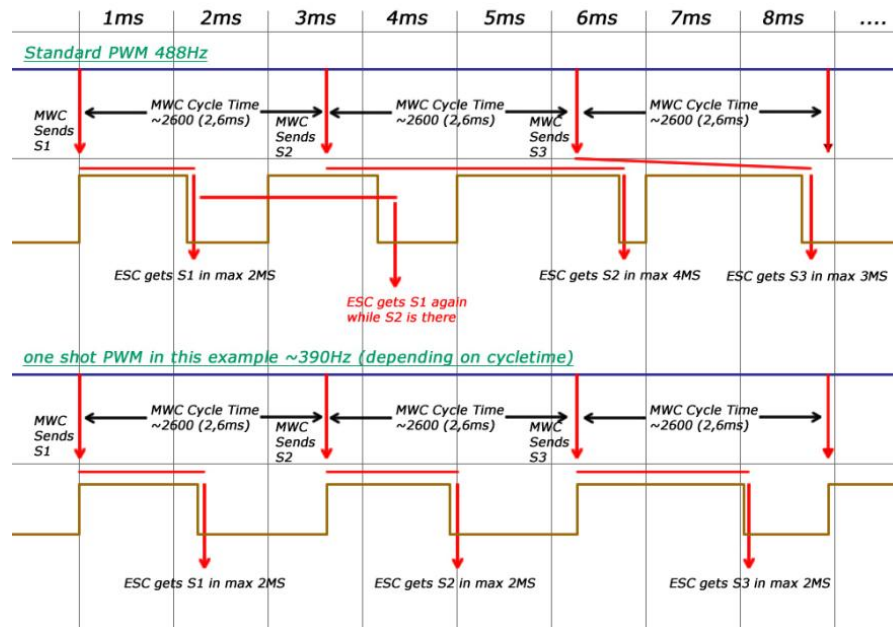


Figura 4. Comparación Oneshot125 con PWM.

Recientemente ha surgido un nuevo protocolo de comunicación entre la controladora de vuelo y los variadores electrónicos con ventajas más allá de la velocidad de comunicación.

Este protocolo se llama Dshot²³ y la D de su nombre proviene de digital, las principales ventajas de este protocolo son:

- En primer lugar, con este protocolo ya no será necesario calibrar los variadores electrónicos.
- La señal es más precisa y más robusta frente al ruido eléctrico.
- Una resolución mucho mayor, 2048 puntos comparada con los 1000 de los protocolos anteriores.
- Es más seguro ya que cada variador puede detectar y descartar datos corruptos.

El resto de protocolos de comunicación entre controladora de vuelo y variadores electrónicos estaban formados por señales que varían la longitud de los pulsos eléctricos para transmitir los valores deseados hasta la aparición de Dshot.

Existen tres versiones del protocolo Dshot y el número que acompaña a cada una de ellas indica la cantidad de datos se envía por segundo:

²¹<https://github.com/betaflight/betaflight/wiki/Frequently-Asked-Questions>

²²<https://github.com/betaflight/betaflight/wiki/Frequently-Asked-Questions>

²³<https://github.com/betaflight/betaflight/wiki/DSHOT-ESC-Protocol>

- DShot600 – 600.000 bits/s
- DShot300 – 300.000 bits/s
- DShot150 – 150.000 bits/s

Para calcular la latencia lo primero que se debe conocer es cuántos bits hay en cada paquete, posteriormente dividir la velocidad del protocolo entre este número de bits.

Cada paquete Dshot contiene 16 bits: 11 bits para indicar el valor (2048 valores de resolución), 1 bit para telemetría y 4 bits para CRC *checksum* (*cyclic redundancy check*).

Por ejemplo, Dshot600 tendría una frecuencia de $600.000/16 = 37500 \text{ Hz} = 37,5 \text{ kHz}$, lo que significa que tardara unos 26,7 us en enviar una señal con el valor de empuje desde la controladora de vuelo hasta el variador electrónico.

Estas son las velocidades de cada protocolo suponiendo que la señal está al 100% del acelerador como se puede comprobar en la Figura 5.

La rápida velocidad de transmisión de Dshot permitiría en teoría llegar a una frecuencia de 33 kHz de *looptime* en la controladora de vuelo (no llegaría a los 37,5 kHz porque es necesario que haya algo de espacio entre los valores). Aunque Dshot600 no es tan rápido como Multishot, es más rápido que cualquier controladora de vuelo existente (el máximo *looptime* posible a día de hoy es 32 kHz en Betaflight con una F4, en el mejor de los casos) por lo que es suficientemente rápido. En cualquier caso, los beneficios que se ha visto que tiene Dshot sobre Multishot, hacen despreciable esa pequeña diferencia de velocidad (9).

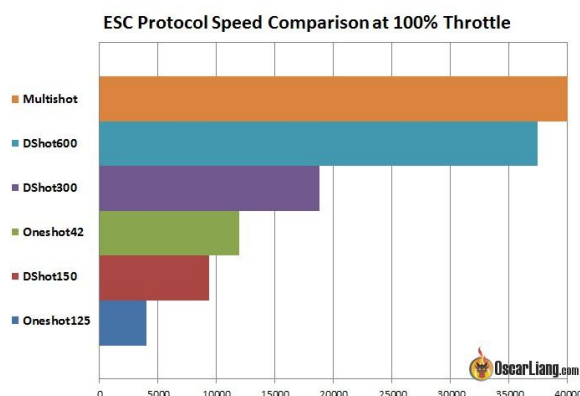


Figura 5. Comparativa de velocidad de protocolos de variadores electrónicos (Hz).

3.3 Receptor

El receptor del drone trabajará a la misma frecuencia que el transmisor y generalmente se alimenta a 5 V. En la mayoría de los receptores actuales existe la posibilidad de configurar un *failsafe*, predeterminedar una posición de los *sticks*, en el caso de que el contacto entre transmisor y receptor se interrumpa por cualquier motivo. En este tipo de drones que no disponen de GPS lo más aconsejable es que se configure el *failsafe* para que los motores se paren por completo en caso de pérdida de conexión.

De esta forma, en el caso poco probable de que el radioenlace se rompa, el drone no mantendrá el último input que tenía, sino que caerá, evitando que los daños sean mayores.

En todas las competiciones de drones es obligatorio tener configurado el *failsafe*, ya sea en el receptor o en la controladora de vuelo y siempre se comprueba antes de iniciar el evento.

3.3.1 Protocolos de comunicación receptor-controladora

Existen diferentes tipos de protocolos de comunicación entre el receptor y la controladora de vuelo, los más comunes son:

- PWM (Pulse Width Modulation) Este es el protocolo más básico de radiocontrol y está obsoleto en el mundo de los drones de carreras, principalmente porque se requiere un cable para cada uno de los canales lo que dificulta mucho el montaje. Es una señal donde la longitud del pulso especifica el valor del canal correspondiente en ese instante.
- PPM (Pulse Position Modulation) También conocido como CPPM o PPMSUM es un protocolo en el que sólo se necesita un cable para todos los canales, en vez de un cable por canal. Básicamente es una señal compuesta de varias señales PWM enviadas una detrás de otra por el mismo cable, pero moduladas de forma diferente.
- SBUS (Protocolo serie). Los protocolos serie son digitales y tienen menos pérdidas y menor latencia, al igual que en PPM solo se necesita un cable. SBUS concretamente es un protocolo de comunicación usado por FrSky que soporta hasta 18 canales usando un solo cable. SBUS es una señal de comunicación UART invertida (10) (11).

En los drones de carreras la latencia de los sistemas (tanto de control del drone, como del video) son muy importantes ya que estos drones pueden llegar a alcanzar velocidades de más de 150 km/h y lo hacen entre obstáculos.

La trama del protocolo CPPM tiene un tamaño de 18 a 27 ms, pero como CPPM es un protocolo poco robusto existe la posibilidad de que haya *glitches* o fallos, por lo que Betaflight realiza una media de tres tramas por lo que la latencia realmente es de 54 a 81 ms. A esto habría que sumarle la latencia que producen algunas opciones de Betaflight como "*RC smothing*" que puede introducir hasta 20ms de latencia e incluso más encaso de activar algunos filtros que actúan en el lazo PID para eliminar ruido. Esto depende de la configuración que se escoja en Betaflight.

Por otro lado, la trama de SBUS es de 9 ms y como SBUS es un protocolo digital y no necesita hacer media de varias tramas porque no hay *glitches* ni fallos ya que tiene un *checksum*. Por este motivo la latencia sigue siendo 9 ms, a lo que se le podría sumar la latencia de las diferentes opciones o filtros de Betaflight.

Pero esta diferencia de latencia es entre seis y nueve veces más, como mínimo, si se usa un receptor CPPM en vez de un receptor SBUS. Por lo que ciertamente los pilotos más experimentados pueden notar mucho esta diferencia de latencia (12).

3.4 Otros componentes

3.4.1 Transmisor

El transmisor con el que se controla el drone no es más que un mando a distancia de aeromodelismo o radiocontrol. El transmisor está compuesto de dos *sticks* principales y diferentes *switches* y potenciómetros que actuarán como canales secundarios.

Con los dos *sticks* controlamos los cuatro canales principales: Throttle, Yaw, Pitch y Roll. Existen varias versiones diferentes de cómo estos canales están relacionados con los movimientos de los *sticks*, el modo más común se puede apreciar en la Figura 6.

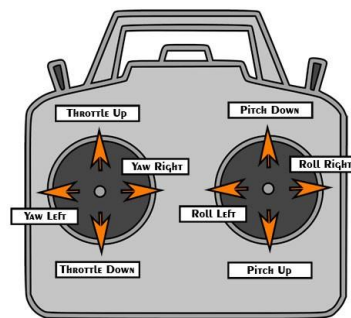


Figura 6. Canales del transmisor (Modo 2).

En la actualidad la mayoría de este tipo de transmisores trabajan a una frecuencia de 2,4 GHz, aunque existen otras opciones si se desean recorrer distancias más largas como los sistemas llamados *long range* que trabajan a frecuencias más bajas como por ejemplo 433 MHz.

En la mayoría de las competiciones es obligatorio que el transmisor y el receptor de los controles del drone trabajen a 2,4 GHz y la marca más común en el mundo de los drones de carreras es FrSky²⁴, esto se debe a numerosos factores, pero el principal de ellos es la robustez de su radioenlace; además sus precios son bastante bajos comparados con el resto de transmisores y receptores del mercado. Sus receptores son muy pequeños, la latencia de sus sistemas es baja y la interfaz de sus emisoras no es excesivamente complicada.

La tecnología ACCST²⁵ de FrSky proporciona una gran robustez del radioenlace debido a que sus sistemas cambian de frecuencia más de cien veces por segundo por lo que no existen conflictos entre señal o interrupciones.

3.4.2 Estructura

La estructura del drone de carreras es generalmente de fibra de carbono, debido a su firmeza, durabilidad y bajo peso. Existen numerosos tipos de estructuras diferentes, pero suelen estar formadas por una placa inferior, de 3 a 6 mm de grosor y o bien unas columnas de aluminio y una placa de fibra de carbono superior más fina (1,5-3 mm) o bien algún tipo de cubierta de plástico que puede estar impresa en 3D o ser de plástico deformado.

Además, existen diferentes formas de la placa principal o inferior, en forma de X perfecta, X deformada, en H etc. Generalmente se ha argumentado que las estructuras en X perfecta

²⁴<http://www.frsky-rc.com/>

²⁵http://www.frsky-rc.com/support/Details.php?data_id=5

tienen mejores características de vuelo debido a que su centro de gravedad es más exacto y el peso esta mejor distribuido, de hecho, para los pilotos que suelen volar de forma acrobática o pilotos de "Freestyle" suelen usar este tipo de estructuras.

Sin embargo, recientemente he colaborado con Storm hobby, una importante marca de drones de carreras en el diseño de una nueva estructura llamada Loki S5 la S se refiere a "*stretch*" o "*stretched*" que como se puede apreciar en la Figura 7, es una X alargada por el eje del Pitch.

Esto se debe a varios factores, en primer lugar, cuando se compite en carreras el drone siempre está inclinado hacia delante y cuanto más velocidad se quiere alcanzar mayor es la inclinación en el eje del pitch.

Si descomponemos el vector de empuje en X e Y veremos como la componente Y del empuje es la que nos proporciona la sustentación y ésta está relacionada con el peso del drone. Mientras la componente Y sea igual al peso del drone mantendrá la altitud. Por otro lado, la componente X es la que nos proporciona la velocidad horizontal. Luego si se desea conseguir una mayor velocidad sin modificar la altitud, (con un drone del mismo peso) la única opción es aumentar el ángulo de inclinación del drone a la vez que se le aplica más potencia a los motores, de esta forma el vector de empuje será mayor, pero al modificar el sentido de este vector podremos conseguir que la componente Y se mantenga aumentando sólo la magnitud de la componente X.

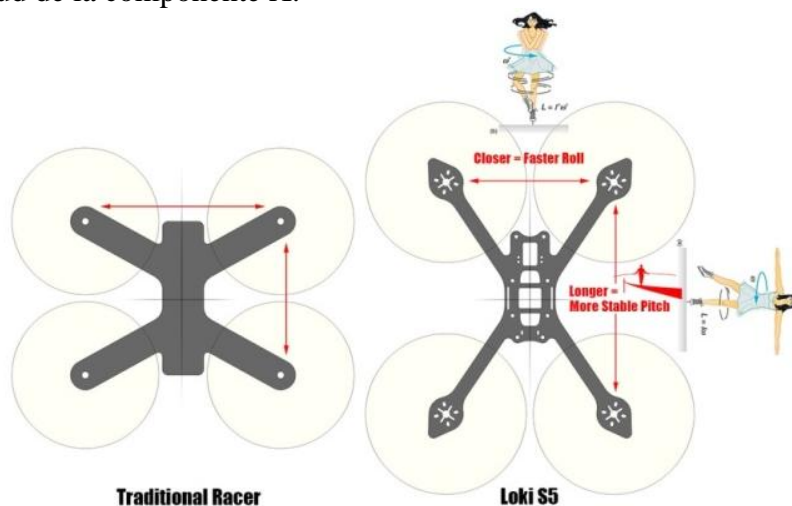


Figura 7 Comparativa Loki S5 con una estructura común.

Una vez comprendido este concepto en las carreras en las que se alcanza una gran velocidad con drones con mucha potencia es difícil jugar con el ángulo de inclinación y el empuje para ganar velocidad sin variar la altitud. Es éste el principal motivo porqué se ha decidido diseñar este tipo de estructura alargada, puesto que si alejamos los motores delanteros y traseros la variación del ángulo de inclinación del drone será más lenta y por lo tanto se tendrá más precisión como se puede observar en la Figura8. Además, al estar los motores más juntos en el eje del "roll" la variación en ese eje será más rápida para facilitar los giros que se requieren en las carreras.



Figura8. Loki S5 Pitch y Roll.(13)

A la hora de elegir la estructura las características más importantes a tener en cuenta son: la durabilidad, el peso, y la superficie del mismo. Las dos primeras son evidentes, cuanto más resistente sea la estructura más difícil será que se rompa en algún impacto. Pero esto va de la mano del peso, cuanto menor sea el peso, mejores prestaciones tendrá (mayor tiempo de vuelo, mayor agilidad y mayor velocidad y aceleración). Por lo tanto, hay que llegar a un punto medio o elegir lo que sea más importante para cada uno.

Por otro lado, la superficie del drone también es importante porque ésta es la que causa una resistencia con el aire que hace que el drone se frene y sea más lento como se puede observar en la Figura 9. Por este motivo suele ser aconsejable tener estructuras con mayor grosor (5-6 mm) pero menor superficie, principalmente en los brazos del drone ya que ese es el área de acción de las hélices.

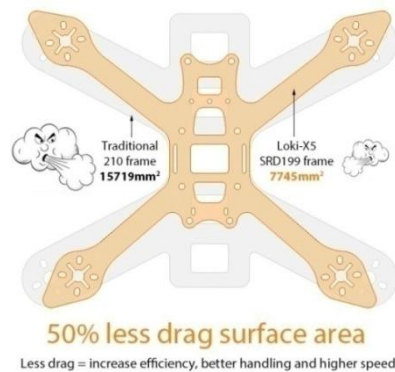


Figura 9. Comparativa de la superficie de la estructura.

3.4.3 Motores

En cuanto a los motores se utilizan motores *brushless* y *outrunners*. Los motores *brushless* fueron un avance esencial para la aparición de los drones actuales. Son motores desprovistos de escobillas, por lo que no existen rozamientos ni corrientes parasitas, ni tampoco un límite de su vida útil debida al desgaste. El motor *brushless* ofrece una mejor relación entre potencia de salida y peso si lo comparamos con los tradicionales motores de escobillas.

Las bobinas de estos se alimentan de manera secuencial. Esto origina un campo magnético que gira con la misma frecuencia que las tensiones de alimentación. El imán permanente del rotor busca en cada instante orientarse en el mismo sentido que el campo. Para que el motor *brushless* gire, las tensiones de alimentación deben ser adaptadas continuamente para que el campo se adelante a la posición de avance del rotor, y así crear un par motor.

Los motores *brushless outrunners* son aquellos en los que la parte giratoria es la campana exterior en la que se encuentran los imanes, la parte interior es la estática que está formada por bobinas.

A la hora de elegir un motor para un drone de carreras hay que tener en cuenta las necesidades que se tengan, el peso en un drone es algo muy importante, pero más aún el peso de los motores. Esto se debe a varios factores, en primer lugar, la durabilidad de la estructura, en el 90% de los casos las estructuras se rompen por los brazos. Por otro lado, en cuanto a las características de vuelo cuanto más concentrada esté la masa del drone hacia el centro de gravedad más fácil será para la controladora de vuelo ajustar la inclinación del drone, realizar giros etc.

Luego cuanto más ligeros sean los motores mejor, pero también hay que tener en cuenta la cantidad de empuje (*thrust*) que generan, la eficiencia de los mismos etc.

En cualquier caso, tanto el empuje como la eficiencia de los motores están muy ligados a la hélice que se escoja (Ver Anexo 1. Hélices).

3.4.4 Batería

Las baterías que se usan en los drones de carreras son de polímero de litio llamas Lipo (*Lithium polymer battery*). Estas baterías están compuestas por celdas que tienen un voltaje máximo de 4,2 V cuando están totalmente cargadas y no es recomendable que el voltaje de estas baterías baje de 3,5 V. Estas celdas están conectadas en serie, y generalmente en drones de carreras se suelen utilizar baterías de 4 celdas o 4s. La capacidad de las baterías se especifica en miliamperios-hora (mAh) generalmente se usan baterías de entre 1000 y 1800 mAh. Otra medida muy importante a la hora de elegir la batería es el C rating. El C rating de la batería hace referencia a la descarga continua que puede soportar la batería. Normalmente aparecen dos valores, el más bajo se refiere a la descarga continua que puede soportar la batería y el valor mayor hace referencia al pico de descarga que puede soportar (menos de 10 segundos) (14).

Generalmente esta medida es totalmente irreal y los fabricantes de baterías utilizan el C rating como una técnica de venta. En la mayoría de los casos las descargas que soportan las baterías son mucho menores a las especificadas.

Para calcular los amperios que puede soportar una batería debemos multiplicar el c rating por los amperios hora de la batería. Es decir, si se tiene una batería de 1500 mAh con un C rating de 60 esto quiere decir que puede soportar una descarga continua de 90 A.

Existen algunas baterías Lipo de alto voltaje o "*high voltage lipos*" (Hv lipo) que cuando están cargadas al 100% alcanzan un voltaje de 4.35 V por celda, estas baterías tienen un rendimiento mayor, pero se han reportado numerosos problemas con la vida útil de la batería y no suelen durar más de 20-30 ciclos de carga. Además, en las competiciones oficiales el voltaje máximo de las baterías es de 17 V luego estas baterías no podrían cargarse al máximo de sus capacidades.

4 Componentes para el vuelo en primera persona (FPV)

Es necesario saber que una de las partes esenciales para el buen desarrollo del vuelo en primera persona o FPV en drones de carreras es la baja latencia de los sistemas. Desde luego la transmisión de video por una red wifi que es la tecnología que se utiliza en muchos de los drones de filmación aérea no es una opción en este campo. Esto se debe a que estos aparatos pueden volar a más de 150 km/h por lo que sólo un segundo es demasiado tiempo si se vuela a esas velocidades entre obstáculos. Es por este motivo por el que las tecnologías de video en este campo siguen siendo analógicas. Lo más importante en esta sección es elegir la frecuencia a la que se va a trabajar.

Hoy en día en la mayoría de los casos se utilizan sistemas de 5,8 GHz y esto se debe en parte al tamaño de las antenas. Hace unos años cuando surgieron los drones de carreras las frecuencias que se ofertaban en las tiendas especializadas eran 900 MHz, 1,2-1,3 GHz, 2,4 GHz y finalmente 5,8 GHz.

Cuanto menor es la frecuencia, mayor es longitud de onda y por tanto mayor es también la dimensión de las antenas. Por lo que en este aspecto la opción más cómoda era sin duda 5.8Ghz. Sin embargo, cuanto mayor es la longitud de onda mayor es también la capacidad de penetración de la señal a los obstáculos.

En el término medio está la frecuencia de 2,4 GHz, pero la mayor parte de los pilotos descartaron en su momento esta opción debido a que en general los controles del dron trabajan a esta frecuencia. Además, la inversión en un sistema de largo rango que no interfiriera en esta frecuencia era un desembolso económico importante. El receptor y las antenas de este sistema *long range* son también bastante grandes y en muchos casos había que modificar el transmisor.

Por otro lado, la frecuencia de 900 MHz y 1,2-1,3 GHz disponían ya de antenas excesivamente grandes, aunque muchos pilotos se decantaron por alguna de estas opciones ya que proporcionaban mayor rango y penetración y los drones de competición vuelan entre obstáculos. Otro aspecto intrínseco a los drones de carrera son los choques o impactos, ya que se intenta llevar al límite estos aparatos. Al ser tan grandes estas antenas, cada vez que había un choque o incluso en aterrizajes no del todo perfectos estas antenas se doblaban y había que estar continuamente volviendo a darle su forma inicial. A todo esto se sumaba que si se escogía la frecuencia de 1,2-1,3 GHz era necesario filtrar los transmisores de video, pues el primer armónico coincide con la banda de trabajo del transmisor, 2,4 GHz.

Esto nos lleva a la última opción que es la que predomina en el 99% de los casos hoy en día, la frecuencia de 5,8 GHz. En esta frecuencia las antenas tienen un tamaño bastante pequeño y manejable, por lo que se pueden cubrir fácilmente con carcasas de plástico para evitar que se dañen en choques o accidentes y facilitan mucho la transportabilidad. Para suplir la falta de penetración que tiene esta frecuencia en comparación con las otras, se transmite mayor potencia y se utilizan antenas direccionales y sistemas de recepción Diversity²⁶.

²⁶http://www.acteurope.de/DIVERSITY-How_it_works.pdf

Las primeras pruebas que se realizaron para este trabajo sobre drones de carreras se utilizó una frecuencia para la transmisión de video de 1,3 GHz debido a la mayor penetración a los objetos y mayor distancia transmitida a igualdad de condiciones (potencia transmitida, ganancia de las antenas, etc) si lo comparamos con frecuencias mayores. Este sistema estuvo funcionando durante más de seis meses, pero debido a las grandes dimensiones de las antenas, su baja durabilidad y que se estaba comenzando a estandarizar la frecuencia de 5,8 GHz en competiciones se decidió cambiar la frecuencia de video a 5,8 GHz.

4.1 Cámara

Como ya se ha comentado la cámara al igual que el resto de componentes del sistema de video serán analógicos para mantener la latencia lo más baja posible. En un principio las cámaras que se utilizaban para el FPV eran cámaras de sistemas de vigilancia y de seguridad, aunque en la actualidad ya se diseñan numerosos tipos de cámaras específicas para el FPV con diferentes características. Existen dos tipos de sensores, CCD o CMOS:

- Los sensores CCD destacan sobre todo en condiciones complicadas de iluminación, ya que tienen un mejor rango dinámico (WDR). El WDR es una característica muy importante en las cámaras para drones de carreras ya que se suele volar en zonas en las que haya tramos que el drone este de cara al sol pero luego este pase entre árboles y zonas de sombra, o incluso se vuela al anochecer donde la iluminación es baja. Por otro lado, las cámaras CCD tienden a sufrir menos efecto “jello” o vibraciones debido a su sensor.
- Las cámaras CMOS usan para captar la imagen el método “*Rolling Shutter*”, o efecto persiana en español; esto significa que la exposición de la imagen se realiza de arriba hacia abajo, por lo que son más propensas a tener el efecto “jello”. Por otro lado, suelen tener más resolución.

Por lo tanto, se buscará una cámara analógica, de baja latencia, preferiblemente con sensor CCD y un buen WDR. Después de estas características se puede observar la resolución de la cámara, desde 480 TVL (*Television lines*) en las cámaras más básicas hasta algunas cámaras CMOS con 1200 TVL que siguen teniendo latencias realmente bajas, pero se debe también tener en cuenta la resolución de la pantalla o gafas que se vayan a usar en recepción.

Otra característica a tener en cuenta a la hora de elegir la cámara es el tamaño y carcasa de la misma. Ya que estos drones vuelan en condiciones extremas es recomendable que las cámaras vayan protegidas por alguna carcasa para proteger sus componentes internos y aislarlos en la medida de lo posible del agua y la suciedad. Además, cada vez las cámaras al igual que la mayoría de los componentes son más pequeñas por lo que se ahorrara peso y espacio.

Adicionalmente existen características que se están añadiendo recientemente a las cámaras, como por ejemplo cámaras con OSD (Ver Anexo 2. OSD) incorporado, o cámaras diseñadas especialmente para volar de noche que funcionan en condiciones luminosidad extremadamente baja, aunque lamentablemente en teoría el vuelo de drones de noche está prohibido en España.

4.2 Transmisor de video

Actualmente en todas las carreras de drones se utilizan transmisores de video de 5,8 GHz estos transmisores tienen diferentes bandas de frecuencia divididas en varios canales como se puede observar en la Figura 10. Tras numerosos problemas para volar con varios pilotos simultáneamente se diseñó una banda llamada Raceband diseñada como su propio nombre indica para carreras.

Se decidió crear una nueva banda en la que se maximizara la separación entre canales y que esta fuese igual para todos. Aún siguen existiendo algunos problemas con los productos de intermodulación, pero en condiciones óptimas es posible que ocho pilotos vuelen a la vez usando las ocho frecuencias de esta banda (15).

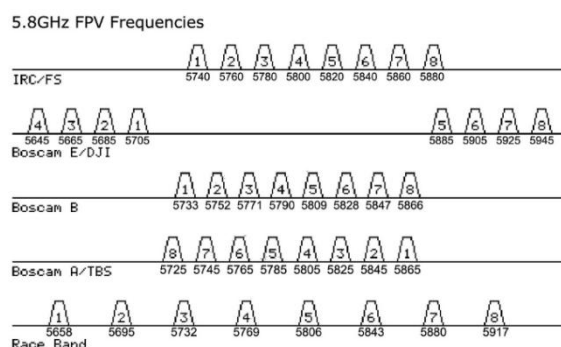


Figura 10. Bandas y frecuencias.

Para garantizar la calidad de video a todos los pilotos que vuelen simultáneamente también hay que tener en cuenta la potencia transmitida. Antigamente los transmisores de video tenían una potencia fija que solía ser 25 mW, 200 mW o 600 mW, pero en la actualidad la mayoría de transmisores modernos tienen una potencia selectiva, es decir se puede escoger la potencia transmitida que se desea en cada momento. Cuando se vuela sólo y más en entornos con muchos obstáculos o se quiere conseguir mayores distancias lo mejor es usar 600mW pero el problema surge cuando se vuela con más gente. Un transmisor de mayor potencia además de transmitir con más fuerza en el canal deseado transmitirá más ruido en el resto de la banda por lo que cuando se vuela con más pilotos lo recomendable suele ser utilizar un transmisor de 25 mW o similar. Además de transmitir a baja potencia es importante adquirir transmisores de calidad que estén bien filtrados para minimizar la potencia emitida en el resto de canales.

En la actualidad los dos transmisores de video más famosos por su calidad y por sus novedosas características son el TBS unify²⁷ o el Tramp²⁸ de Immersion RC²⁹. Estos dos transmisores tienen características similares y en las carreras oficiales suele ser obligatorio el uso de alguno de ellos ya que su calidad está testada. Además, tienen potencia selectiva, y la opción de conectar un cable de señal a la controladora de vuelo para elegir la banda, el canal y la potencia transmitida desde el OSD del drone, facilitando en gran medida estos ajustes. Adicionalmente el Tramp dispone de un dispositivo opcional llamado Wand que permite al juez de la carrera cambiar en tan solo un segundo y sin necesidad de encender el drone estos parámetros en el transmisor de cada uno de los pilotos.

²⁷http://team-blacksheep.com/products/prod:unify_pro

²⁸<https://www.immersionrc.com/fpv-products/tramp-hv-5-8ghz-video-transmitter/>

²⁹<https://www.immersionrc.com/>

4.3 Antena

Las antenas son una parte muy importante del sistema de FPV. Las antenas que se usan suelen ser antenas omnidireccionales de polarización circular. La elección de la polarización circular se debe a varios motivos. El primero de ellos es que al estar los drones en constante movimiento y cambiar su inclinación sin cesar, si se utilizase una sola antena de polarización lineal se perdería gran parte de la señal en los giros debido a que la orientación (vertical, horizontal, etc) no coincidiría la mayoría del tiempo con la del receptor. Por otro lado, como ya se ha comentado la esencia de los drones de carreras es volar entre obstáculos, por lo tanto existe una gran reflexión de la señal al incidir en ellos (más aun habiendo escogido una frecuencia alta que tendrá mayor reflexión y menor penetración al impactar con obstáculos). En polarización lineal, cuando la señal incide sobre un objeto la señal reflejada sigue teniendo polarización lineal por lo que el drone captaría esa señal reflejada como una señal interferente. Sin embargo, al escoger una polarización circular, supongamos que a derechas, al incidir esta señal sobre un obstáculo la señal dejaría de tener una polarización circular a derechas y tendría unas características más similares a una polarización circular a izquierdas. Por lo que el drone con antena circular a derechas no captaría esta señal reflejada o la captaría en una medida mucho menor reduciendo así las interferencias por reflexión. Además, actualmente en carreras (en las que los obstáculos suelen ser de plástico o ser muy finos, por lo que la reflexión no sería excesivamente alta) se plantea la opción de volar con polarizaciones circulares alternas intercambiando a derechas y a izquierdas para minimizar las interferencias entre los pilotos con canales de frecuencia cercanos.

El parámetro de las antenas que evalúa la relación de recepción de la antena entre un sentido y el otro de polarización, en este caso a derechas y a izquierdas es el ratio axial. Por lo que para esta aplicación en la que la pureza de la polarización es algo muy importante, se intenta conseguir antenas con el mayor ratio axial posible.

Las antenas que se suelen utilizar hasta ahora son antenas de lóbulos omnidireccionales. Existen diferentes tipos de antena desde tres hasta cinco lóbulos y las especificaciones varían en función del fabricante. Estas antenas tienen en general buenas prestaciones y se suelen cubrir con una funda protectora de plástico duro para evitar que se dañen o se deformen los lóbulos. El problema de estas antenas es que suelen ser caras debido a que a la hora de fabricarse hay que ser cuidadoso soldando los lóbulos.

4.3.1 Antenas Pagoda

Recientemente Maarten Baert ha diseñado un nuevo tipo de antenas impresas de polarización circular, llamadas Pagoda (ver Figura 11) que tienen muchas ventajas sobre las antenas tradicionales.

En primer lugar, tienen un buen diagrama de radiación omnidireccional y un axial ratio mucho mayor que las antenas de lóbulos mejorando las prestaciones. En segundo lugar, los costes se reducen significativamente al ser impresas y solo tener que soldar estas PCBs al coaxial. Por último, tienen unas dimensiones reducidas y si se cubren con alguna carcasa de plástico son casi indestructibles.

Estas son las especificaciones:

- Ancho de banda: 500 MHz (5,55 – 6,05 GHz)
- $S_{11} < -20$ dB, VSWR < 1.22 (a la frecuencia central)
- Axial ratio: $< 1,3$
- Ganancia: 1,2 dBi
- Eficiencia de radiación: 95%

El mejor caso y el peor caso de la Figura 11 y la Figura 12 corresponden a diferentes suposiciones sobre qué pasa con las señales que viaja a lo largo de la parte exterior del coaxial. En el mejor caso estas señales son completamente absorbidas por el otro extremo del coaxial. En el peor caso estas señales son completamente reflejadas hacia la antena. En este último caso generalmente se producen en ondas estacionarias en el exterior del coaxial, lo que hace que el propio coaxial radie e interfiera con el diagrama de radiación de la antena. Esta es la razón por la cual el diagrama de radiación es menos uniforme. La realidad será un punto intermedio entre estos dos extremos.

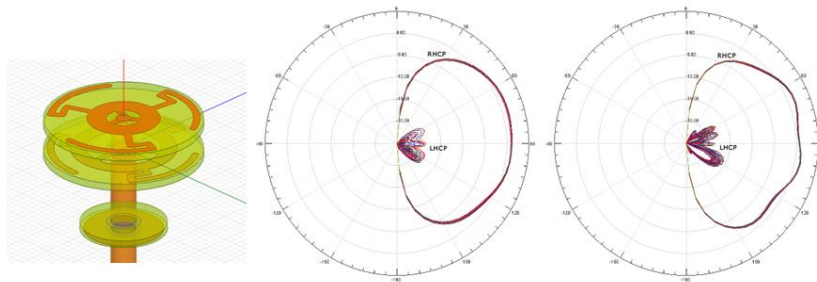


Figura 11. Modelo de simulación antena Pagoda, mejor y peor caso del diagrama de radiación.

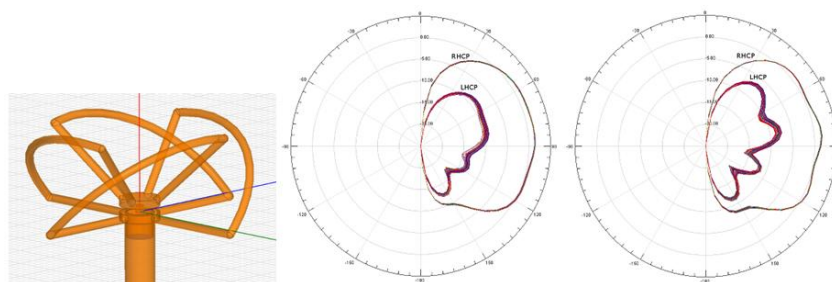


Figura 12. Modelo de simulación de referencia, Antena de 4 lóbulos (*cloverleaf*), mejor y peor caso del diagrama de radiación.

Como se puede observar en la Figura 11 y la Figura 12 la diferencia entre la componente copolar (derechas, deseada) y la contrapolar (izquierdas, no deseada) es mucho mayor en la antena Pagoda que en la antena de 4 lóbulos. Esto se debe a que el ratio axial de la antena Pagoda es mucho mayor.

Como se verá posteriormente las tolerancias a la hora de soldar las PCBs al coaxial en este diseño son muy bajas. Debido a que estas antenas se sueldan manualmente y a que no todas las marcas de FR4 tienen la misma constante dieléctrica son de esperar ciertas variaciones en cuanto al ajuste de la frecuencia central (ver Figura 13), pero estas pequeñas variaciones no son suficientemente grandes como para que afecten en gran medida. (16)

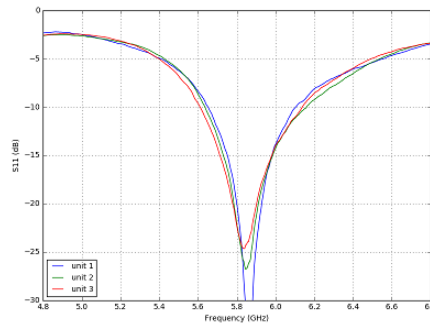


Figura 13. Parámetro S11 de tres antenas Pagodas.

4.4 Receptor

Existen diferentes tipos de receptores, aunque los más usados son los receptores que están integrados en las gafas o pantallas por las que los pilotos reciben la señal.

La gran mayoría de pilotos de drones usan algún modelo de gafas de la marca Fat Shark³⁰, que hasta hace poco era la única opción disponible para los pilotos. Estas gafas disponen de un módulo receptor para evitar tener que llevar un receptor aparte y minimizar el tiempo de preparación antes del vuelo pues el módulo está ya integrado en las gafas.

Otra opción sería un módulo receptor externo montado sobre un trípode y conectar desde éste un cable hasta las gafas o la pantalla (ver Anexo 3. Gafas y pantalla).

Existen algunos receptores tanto externos como módulos para gafas FPV que disponen de Diversity. El Diversity es un sistema de recepción que se compone de dos antenas.

Las señales de RF llegan a través de las antenas del receptor a los circuitos RF de ambos receptores. Allí son desmoduladas y de cada una resulta una señal LF de la que se puede evaluar cualitativamente. Estas señales van ahora al ordenador Diversity de los dos receptores (ver Figura 14). Ambos ordenadores se comunican entre sí y deciden, qué señal de qué receptor es mejor y esa es la que se muestra en las gafas o pantalla. Este sistema que en ocasiones se utiliza en los sistemas receptores de video, es el mismo que se utiliza en la mayoría de receptores del control del drone (17).

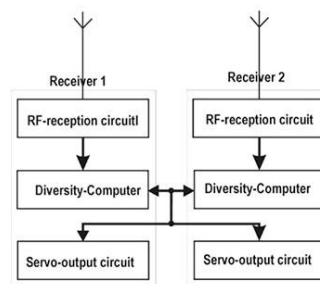


Figura 14. Esquema Diversity.

Normalmente cuando se usa este tipo de dispositivos, se utilizan dos antenas direccionales en el caso de que el área en el que se vaya a volar este en una dirección concreta o una omnidireccional y una antena direccional apuntando hacia la zona más crítica.

³⁰<http://www.fatshark.com/>

5 Elección de componentes y montaje

En esta sección se va a proceder a la elección de cada uno de los componentes y a explicar el proceso de montaje del drone de carreras. En el drone que se va a construir se busca tener altas prestaciones para carreras, pero además buena durabilidad y una eficiencia relativamente alta.

Para empezar, se ha escogido la estructura Loki S5³¹ de 5mm de grosor, esta elección se debe a varios motivos, el principal es que es una estructura *Streched* o alargada que como se ha explicado en la sección tres, tienen el eje de motores delantero más separado de lo normal del eje de motores trasero, para facilitar el ajuste del ángulo de inclinación del drone y tener más precisión en el pitch. Así mismo al tener los motores más juntos con respecto al eje del roll tendremos unos giros más agresivos, lo que nos ayudara a virar más rápidamente incluso a alta velocidad.

Se ha escogido la versión de 5mm en vez de la versión de 4mm para ganar algo de durabilidad y que sea más resistente a los impactos aumentando sólo 20 g el peso total de la estructura.

La controladora de vuelo que se ha escogido es una Hglrc³² que es una controladora de vuelo con procesador F3 que además hace de PDB con BEC y lleva integrado un OSD lo cual facilitará mucho el cableado del aparato y ahorrará peso y espacio.

Aunque esta controladora de vuelo cuenta con un giróscopo modelo 6050 más antiguo, pero más resistente al ruido que el nuevo modelo 6500, se ha decidido montar la placa sobre unas gomas de silicona para amortiguar las posibles vibraciones que pudieran afectar a la placa.

Una vez atornillada la controladora a la estructura se procederá a soldar primero los cables con el conector de la batería (se usará un conector XT60) y posteriormente se soldarán los cuatro variadores electrónicos (ver Figura 15), en este caso se han escogido unos variadores Aikon de 30 A que usarán el último protocolo de comunicación del firmware BIHeli_S, Dshot.

Estos variadores (ver Figura 15) son económicos y tienen un buen rendimiento, pero el motivo principal por que han sido escogidos es su tamaño. Al tener un tamaño más reducido de lo normal no sobresalen de los estrechos brazos de la estructura escogida, por lo que están más protegidos contra posibles impactos. El motivo principal por el que son tan pequeños es que estos variadores no tienen BEC, pero al disponer la controladora de vuelo de un regulador a 5 V y otro a 12 V no será un problema.

Se podría haber escogido un variador 4 en 1 que tienen las mismas dimensiones que la controladora de vuelo y se monta encima o debajo de esta. En ese caso se ahorraría algo de peso, pero el problema de este tipo de variadores conjuntos es que en caso de que haya algún problema y se dañe uno de los variadores habría que modificar la placa completa con los cuatro componentes, lo que tiene un coste bastante alto.

³¹<http://www.helipal.com/storm-racing-drone-loki-s5-stretched-arms-frame-set-5-5-5mm.html>

³²<http://www.helipal.com/hglrc-sp-racing-f3-v2-flight-controller-3-in-1.html>



Figura 15. Vista del variador electrónico Aikon 30 A.

Una vez soldados los variadores a la controladora podemos proceder a soldar los tres cables de cada motor al variador correspondiente, como ya se mostró en la Figura 1 los motores uno y cuatro deben girar en sentido horario y los motores dos y tres en sentido anti horario. Hay dos formas de conseguir que los motores giren en el sentido deseado, la primera opción es que, si al soldar indistintamente los tres cables del motor a los tres *pads* del variador el motor no gira en el sentido deseado, se intercambian dos cables, invirtiendo así el sentido de giro del motor. La segunda opción es conectar la controladora a un ordenador y a través del BLHeli suite (el software que modifica la configuración de los variadores) seleccionar la opción de invertir el sentido de giro en el motor deseado.

Se han escogido unos motores 2205 (ver Anexo 4. Tamaño motores brushless) de 2350 KV de la marca Storm (ver Figura 16), el motivo por el cual se han escogido estos motores, es porque son unos motores muy ligeros (25 g) y que nos proporcionaran un buen empuje con una buena eficiencia gracias a su relativamente bajo KV. Gracias a este bajo KV podremos elegir un mayor rango de hélices posibles, para adaptar el drone a diferentes tipos de carreras, de resistencia en cuyo caso escogeremos una hélice 5x4x3 (ver Anexo 1. Hélices) que nos proporcionara un tiempo de vuelo de unos tres minutos y medio con la batería de 1500 mAh o una pala agresiva como 5,1x5,2x3 que nos proporcionara un tiempo de vuelo de poco más de dos minutos, pero tendremos un drone mucho más rápido y reactivo.



Figura 16. Motor Storm 2205 2350 Kv.

Una vez finalizado el paso anterior se pueden soldar los tres cables del receptor a la placa, en este caso se va a utilizar un receptor FrSky usando un protocolo digital para minimizar la latencia (SBUS). Los cables de receptor se sueldan a un UART de la controladora, en este caso se ha escogido soldarlo al UART 3 (ver Figura 17) pero se podría haber soldado a cualquier otro. Se conecta la alimentación (en este caso 5 V para este receptor, existen otros receptores que trabajan con un voltaje de 3,3 V) la masa del receptor y se suelda el cable de señal.

Puesto que la controladora ya dispone de un OSD no se ha soldado el cable de telemetría, ya que gracias al OSD podremos visualizar el voltaje de la batería (entre otros parámetros) desde las gafas de realidad virtual, o la pantalla.

Hasta aquí llegaría la primera sección de componentes esenciales para que el drone pueda volar, sólo a falta de instalar las hélices y la parte superior de la estructura del drone.

Para instalar la parte del FPV se sueldan los tres cables de la cámara (señal, alimentación y masa) se ha escogido una cámara analógica de 600 TVL, con una lente de 2,5mm. La cámara soporta un voltaje de 5 a 22V, por lo que se podría soldar al *pad* de 5 V o al de 12 V, pero se ha decidido soldar al *pad* de 12V para evitar posibles problemas en momentos de fuerte descarga de la batería. También se suelda el negativo a masa y el cable de señal al *pad* correspondiente "CAM" (ver Figura 17). Se procede de la misma forma con el transmisor de video soldando la masa, la alimentación a 12V y el cable de señal al *pad* el transmisor de video al *pad* "VTX". En este caso se ha escogido un transmisor de video de la marca Immersion RC concretamente el Tramp HV que tiene numerosos beneficios ya comentados en la sección anterior. Se soldará el cable de telemetría del Tramp al UART2 para poder modificar desde el OSD todos los parámetros relacionados con el transmisor de video.

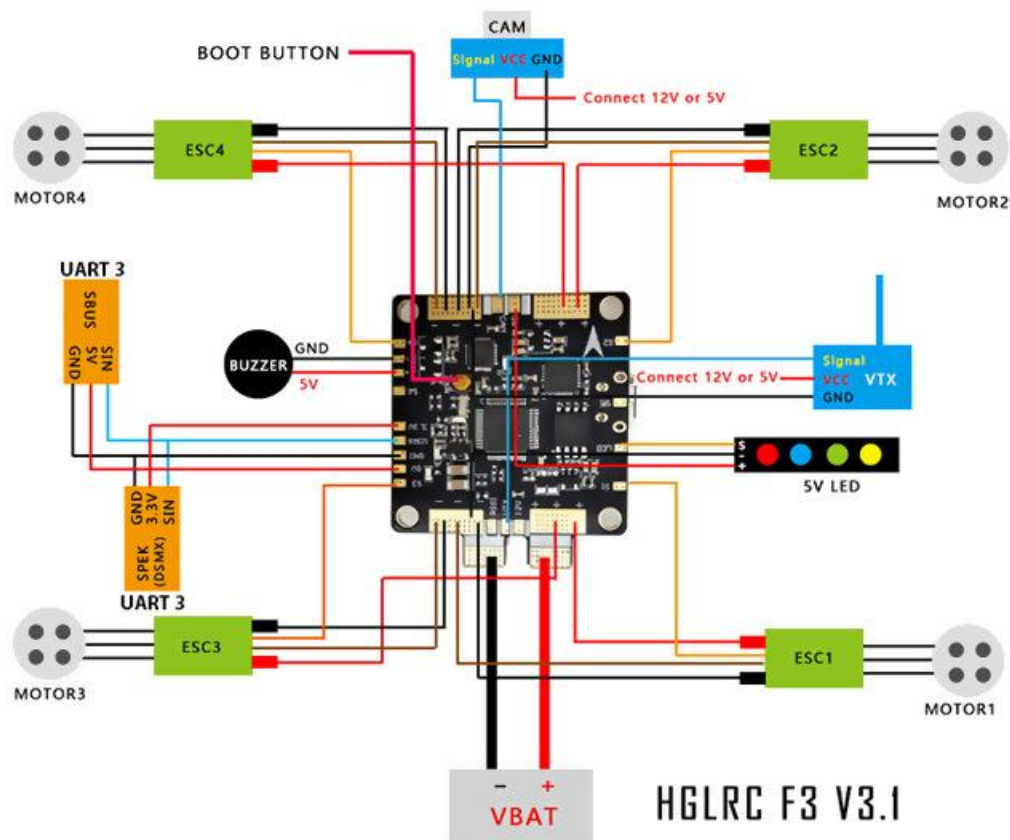


Figura 17. Conexión y cableado de los componentes del drone.

En cuanto a la antena se ha decidido construir nuestras propias antenas Pagoda.

Para empezar, se necesita conseguir los materiales, las PCBs, los coaxiales y adicionalmente una estructura de madera cortada con láser para facilitar el ensamblaje y soldadura de las antenas. Esta estructura se podría haber impreso en 3D, pero no es recomendable ya que las tolerancias a la hora de soldar las PCBs al coaxial son muy bajas (0,1 mm. ver Figura 18) por lo que para intentar realizar este trabajo con la mayor precisión posible se ha decidido encargar estas piezas a una empresa corte de madera con laser que tiene una precisión mucho mayor a la de las impresoras 3D a las que tenemos acceso.

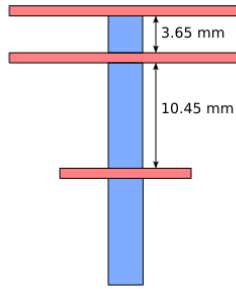


Figura 18. Esquema ensamblaje antena Pagoda.

En primer lugar, se descargan los tres archivos Gerber (cada antena contiene tres piezas impresas diferentes) y se encargan a alguna empresa la construcción de estas piezas.

En la web del fabricante deberemos seleccionar numerosas opciones, como el sustrato FR4, dos capas, espesor de 1 mm y el resto de opciones siguiendo las indicaciones del diseñador Maarten Baert.

Por otro lado, se encargan las piezas para la estructura de madera (ver Figura 19) y se compran los coaxiales. En este caso se ha decidido comprar cables coaxiales con conectores SMA ya soldados en los extremos (ver Figura 19), de esta forma con cada cable podremos construir dos antenas (cortándolo por la mitad) y nos ahorraremos el proceso de soldar el conector SMA.

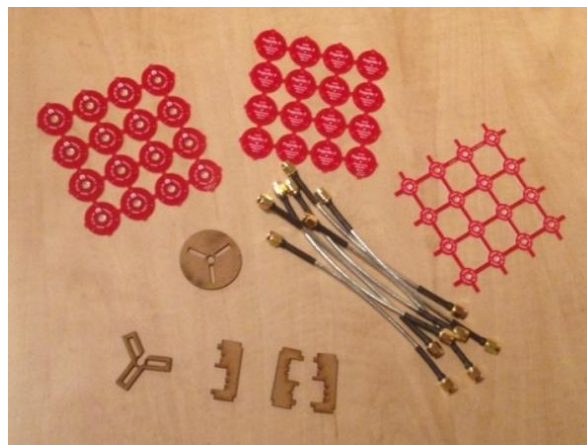


Figura 19. Componentes para construir las antenas Pagoda.

Una vez tengamos todo lo necesario se comenzará cortando por la mitad el cable coaxial y en por esta parte en la que el coaxial queda expuesto se cortaran 3 mm del recubrimiento y el dieléctrico sin dañar el vivo. En segundo lugar, se introducirán las tres PCBs en el orden y sentido adecuado pero solo se encajará en las piezas de madera la PCB que está más alejada del conector SMA, una vez encajada se procederá a soldarla al coaxial. Posteriormente, se desencajarán las piezas de madera y se volverán a encajar ahora con todas las PCBs en su sitio, teniendo en cuenta que es muy importante seguir las marcas de alineación de las dos PCBs de mayor tamaño. Una vez alineadas soldamos las dos PCBs que faltan (ver Figura 20).



Figura 20. Construcción antena Pagoda.

Finalmente podemos añadir piezas impresas en 3D para reforzar la antena y mejorar su durabilidad (ver Figura 21).



Figura 21. Antenas Pagoda con carcasas protectoras impresas en 3D.

Una vez conectada la antena de polarización circular al conector SMA del transmisor de video estaría completado el ensamblaje de componentes (ver Figura 22).



Figura 22. Drone.

Adicionalmente se ha decidido instalar un *buzzer* en la placa que se podrá accionar desde un *switch* en el transmisor, para encontrar más fácilmente el aparato en caso de impacto en una zona de hierba alta o en cualquier situación en la que se haya perdido la localización exacta del modelo. Y también se han instalado unos LEDs (ver Figura 17).

Otra acción importante es asegurar las antenas del receptor, estas antenas son dos monopolos que reciben conjuntamente la señal del transmisor, por lo que es muy importante que estas antenas estén instaladas formando un ángulo de 90 grados para maximizar la recepción de señal (ver Figura 23).



Figura 23. Drone terminado, detalle antenas del receptor alineadas 90° entre sí.

6 Integración, Pruebas y resultados

Una vez terminado el proceso de montaje del drone, el siguiente paso es proceder a la configuración del mismo.

6.1 Configuración de los variadores y la cámara de FPV

Existen diferentes componentes a configurar. En primer lugar, lo más importante es que cada motor gire en el sentido que le corresponde, si no se ha hecho esto intercambiando los cables del motor al variador deberá hacerse a través de BLHeliSuite. BLHeliSuite es el software que configura los diferentes ajustes de los variadores BLHeli.

Existen numerosas versiones de este programa con diferentes opciones (ver Figura 24), pero en todas ellas existe la opción de cambiar el sentido de giro del motor. Otra acción importante es activar la opción *Damped light* también conocido como *active braking*. Lo que hace la opción *Damped light* es frenar el motor en caso de que la señal que llegue al variador tenga un valor menor a las revoluciones actuales del motor. Si esta opción está desactivada el variador no hará nada y dejará que el rozamiento frene poco a poco el motor. Esta opción es muy importante en drones porque proporciona mucha estabilidad y control al aparato. En BLHeli es una opción que se puede activar o desactivar, pero en la versión más moderna BLHeli_S está activada por defecto y no se puede desactivar.

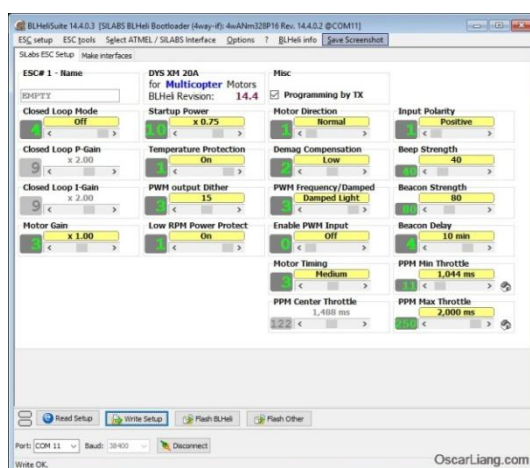


Figura 24. BLHeliSuit.

Posteriormente se debe comprobar que el sistema de video funciona correctamente y se pueden ajustar los parámetros de la cámara de FPV, colores, brillo etc. Es recomendable activar en la cámara la opción del WDR si ésta dispone de ella.

6.2 Configuración de la controladora de vuelo, Betaflight

El siguiente paso es conectar la controladora de vuelo al ordenador, mediante el configurador de Betaflight podremos ajustar todos los parámetros necesarios. Tanto Betaflight como BLHeliSuite son softwares que se actualizan constantemente y existen numerosas versiones diferentes con diferentes características. En la mayoría de los casos los parámetros que vienen por defecto en Betaflight son los que se utilizan normalmente pero siempre deberemos hacer algunos ajustes. Como se puede observar en la Figura 25, a la derecha de la interfaz podemos encontrar diferentes pestañas. En la pestaña de Ports

debemos seleccionar el UART que corresponde al receptor y el UART que corresponde a al transmisor de video o Blackbox.

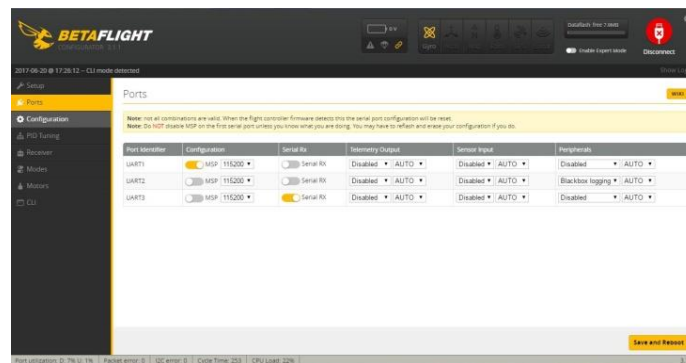


Figura 25. Betaflight, puertos.

En la siguiente pestaña, la de configuración hay que seleccionar el tipo de configuración en este caso cuadricóptero en X, el tipo de protocolo que se usará para comunicarse con los variadores electrónicos y el tipo de protocolo para comunicarse con el receptor en este caso SBUS (ver Figura 26).

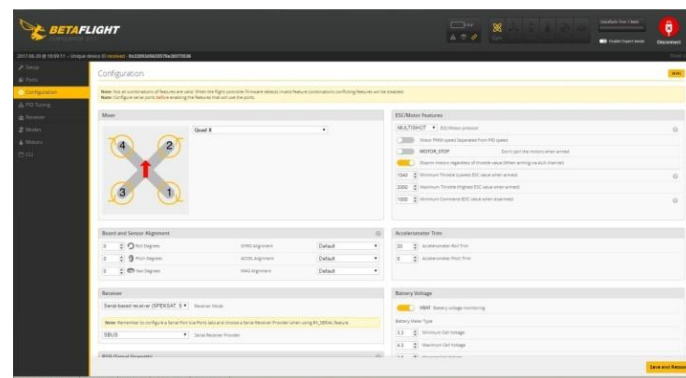


Figura 26. Betaflight, Configuración (1).

En esta misma pestaña otro valor importante que hay revisar es el *PID loop frequency* (ver Figura 27) o frecuencia del lazo PID. Esta frecuencia suele estar entre 1 y 32 kHz. En este caso ya que se está usando una controladora F3 se utilizará una frecuencia de 8 kHz. También podremos seleccionar las opciones deseadas en este caso OSD, LED_Strip, Airmode y Blackbox (ver Figura 27).

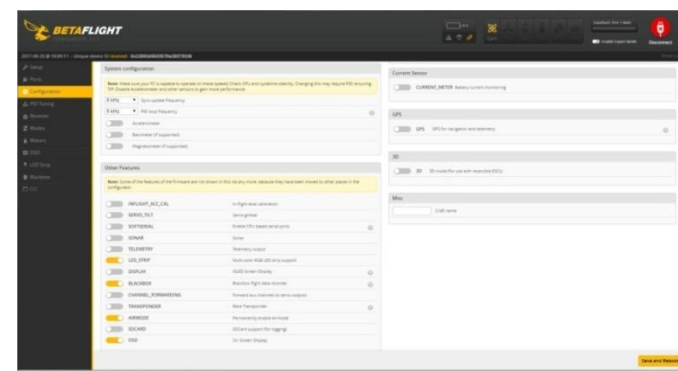


Figura 27. Betaflight, configuración (2).

En la pestaña del receptor es necesario ajustar los canales para que concuerden con los del transmisor, en este caso el transmisor tiene asignado los canales de la siguiente forma *Throttle* (canal 1), *Aileron/Roll* (canal 2), *Elevator/Pitch* (Canal 3) y *Rudder/Yaw* (canal 4) por eso para configurarlo se debe escribir en *Channel Map* TAER1234 (ver Figura 28).

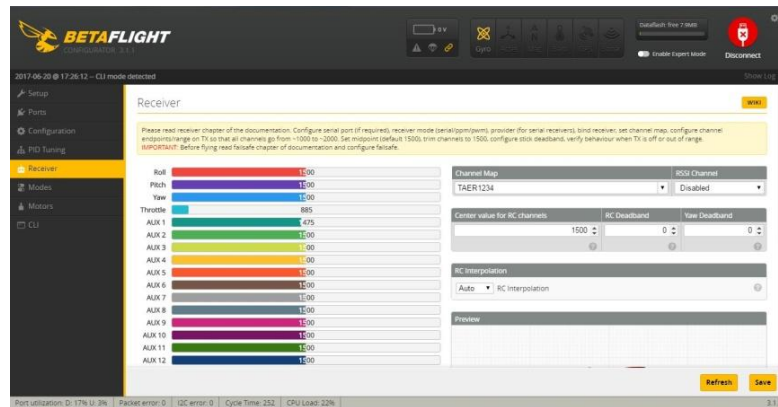


Figura 28. Betaflight, receptor.

En la pestaña de modos podemos seleccionar diferentes modos de vuelo y acciones que se activarán a través de canales auxiliares. El modo que se usa en carreras de drones es el modo "*acro*" que aparece en la Figura 29 como *ARM*. Este modo de vuelo es el más básico y libre, el único sensor que entra en juego es el giróscopo, el resto están desactivados y el piloto tiene todo el control del aparato.

Existen otros modos de vuelo como *Angle* y *Horizon* que no aparecen en la Figura 29 porque en este caso el acelerómetro está desactivado. En estos modos el acelerómetro ayuda a nivelar el drone y mantenerlo horizontal. Estos modos sólo suelen utilizarse cuando se está aprendiendo.

Por otro lado el *Air mode* es un modo de vuelo que se introdujo para poder tener pleno control del drone incluso cuando el *throttle* está al mínimo. Cuando este modo no está activado la autoridad del drone es limitada en zonas bajas del *thrtottle*. Con este modo en caso de ser necesario la controladora aplicará más *throttle* instantáneamente para poder aumentar la autoridad del drone y poder así realizar la maniobra deseado o combatir el viento (18). Adicionalmente se podrá activar la alarma o el *failsafe* desde un canal auxiliar si se necesita.

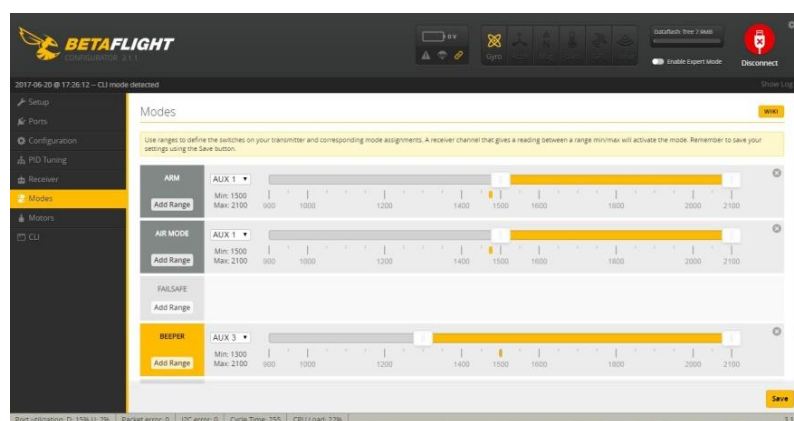


Figura 29. Betaflight, modos.

La pestaña más importante es la de los PIDs, con los parámetros "RC Rate" y "Super Rate" podremos ajustar la curva de sensibilidad que percibiremos en cada canal en el transmisor (ver Figura 30).

Los PIDs son los parámetros que hay que configurar para que el drone vuele correctamente, antes de que se creara Betaflight conseguir una buena configuración de PIDs era una tarea realmente compleja, en la actualidad existen un mayor rango de valores válidos para que el drone funcione correctamente.

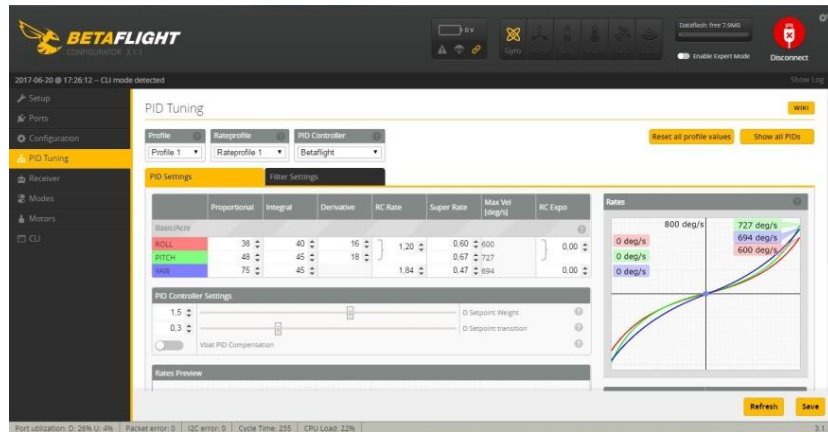


Figura 30. Betaflight, PIDs.

6.2.1 PIDs

PID son las siglas para (Proporcional Integral Derivativo). Estos tres parámetros son usados para el algoritmo de cálculo del controlador PID. Un controlador PID es un mecanismo de control que calcula la desviación o error entre un valor medido y el valor que se quiere obtener para aplicar una acción correctora (ver Figura 31).

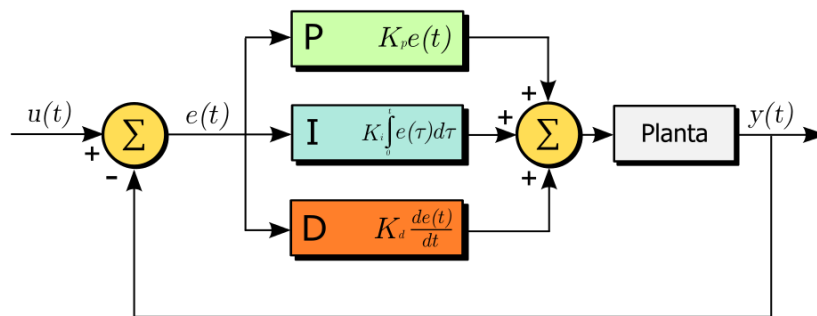


Figura 31. Esquema controlador PID.

Un controlador PID tiene diversas aplicaciones: control de presión, flujo, fuerza, velocidad, aplicaciones químicas, etc. En el caso de los multirrotores, la función del sistema PID es ajustar la inclinación y velocidad del drone de acuerdo con la información que se recibe de los *sticks* del transmisor. Para ello el sistema PID mide la inclinación en todo momento gracias al giroscopo y la modifica variando la velocidad de cada motor. Para configurar correctamente los PIDs es importante desactivar el resto de sensores (modo *acro*) para que no interfieran en la calibración(19).

6.2.1.1 Proporcional

La P hace referencia a la parte proporcional del error y es el valor más importante ya que indica el nivel de corrección necesario a aplicar. Cuanto más grande sea P, más intentará estabilizar la placa controladora, pero si el valor es demasiado alto, el aparato se volverá demasiado sensible y provocará oscilaciones. Posibles escenarios:

- Si el valor de P es muy bajo el drone será muy difícil controlar porque será muy fácil sobre-correr las maniobras cosa que hará imposible mantenerlo estable.
- Si el valor de P es correcto nos será fácil mantener la estabilidad y acelerará correctamente al aplicar o dejar gas.
- Si el valor de P es demasiado alto el drone oscilará rápidamente o los motores emitirán un sonido oscilante y agudo. También ganará altura fácilmente (a veces como a saltos) y será difícil mantenerla.

6.2.1.2 Integrador

La I, corregirá el error en el tiempo. Si se deja la I a 0, se notará que el movimiento del drone es muy robótico y brusco. Posibles escenarios:

- Si el valor de I es muy bajo el drone tenderá recobrar una posición horizontal, aunque lo inclinemos hacia delante con el pitch y a cambiar de dirección, también será mucho más sensible al viento.
- Si el valor de I es correcto mantendrá el ángulo de forma mucho más precisa.
- Si el valor de I es demasiado alto el drone oscilará lentamente y tenderá a inclinarse hacia delante cuando cambiamos de dirección.

6.2.1.3 Derivativo

La D hace referencia a la variación del error. Lo que hará la D es hacer más suave el movimiento y atenuar las oscilaciones provocadas por la P en cambios de dirección bruscos ayudando corregir el error de posición. Posibles escenarios:

- Un valor de D muy bajo hará que el drone oscile con movimientos bruscos y hará que el drone se comporte de forma más robótica y menos fluida.
- Un valor de D adecuado eliminará las oscilaciones al terminar maniobras bruscas provocadas por la P y no provocará oscilaciones en el resto de situaciones.
- Un valor de D demasiado elevado provocará oscilaciones rápidas constantemente, aunque el drone esté haciendo *hover* y no se hayan realizado maniobras bruscas. Además, se calentarán notablemente los motores, pudiendo llegar a quemarse en casos extremos.

6.2.2 Blackbox

Blackbox es una herramienta disponible en Cleanflight y Betaflight que permite grabar y analizar una gran cantidad de datos que pasan por la controladora de vuelo, como las señales de los canales que llegan al receptor, los valores de los giróscopos, como actúan los PIDs en cada uno de los ejes y las señales que cada uno de los variadores envían a cada motor en todo momento.

Ajustar los PIDs era una tarea complicada antes de la invención del Blackbox. Con esta herramienta se pueden ajustar los PIDs de forma más científica y permite ver exactamente qué causa las vibraciones en cada ocasión y que valores deben ajustarse.

Generalmente antes de adentrarse en el ajuste de los PID's es recomendable comprobar los datos de los motores para asegurarse de que no existe ningún problema ajeno a los PID's. En primer lugar, hay que comprobar que cuando el drone está estable los 4 motores tienen un output parecido, en caso de no ser así probablemente existirán problemas con el centro de gravedad o hélices o motores en malas condiciones. Por ejemplo que los dos motores traseros estén más revolucionados que los motores delanteros indica que el centro de gravedad está desplazado hacia la parte trasera del drone (ver Figura 32) y se debe corregir reubicando los componentes del mismo, generalmente suele ser suficiente desplazando la batería hacia delante (20).

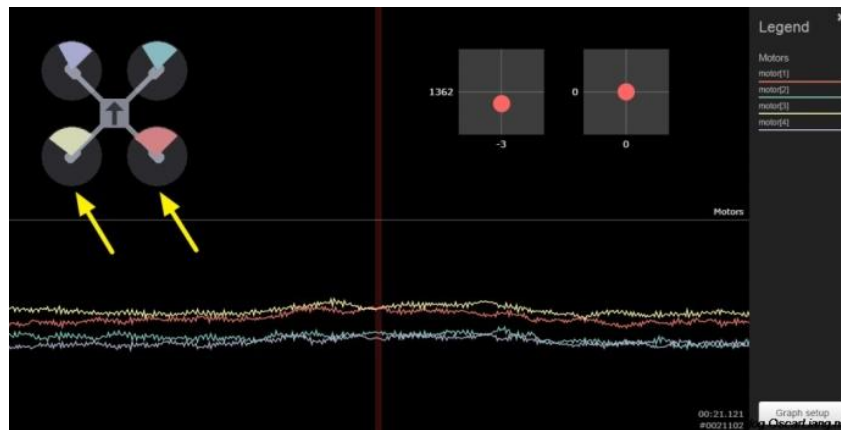


Figura 32. Blackbox, motores traseros más revolucionados que los motores delanteros.

Si sólo uno de los motores está más revolucionado que el resto probablemente esto indique que esa hélice, motor o variador está en malas condiciones. En el caso de que todos los motores tengan outputs parecidos mientras el drone está estable esto querrá decir que los motores hélices y centro de gravedad están correctos (ver Figura 33).

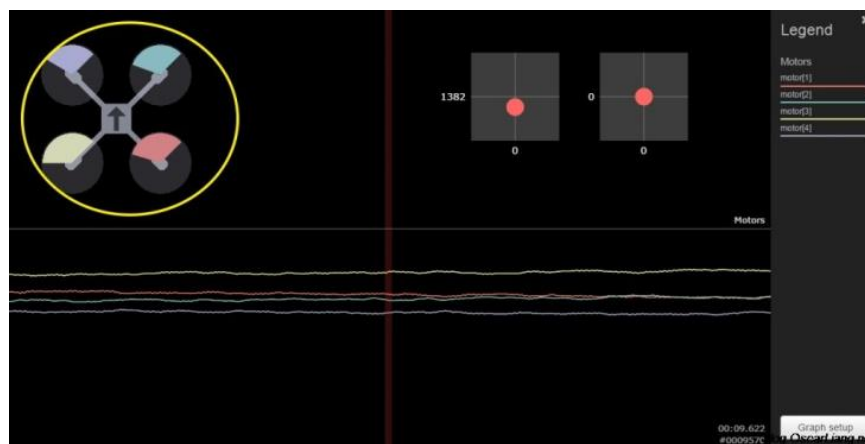


Figura 33. Blackbox, motores con revoluciones similares.

Cuando el ajuste de los PID's es adecuado observaremos los siguientes síntomas.

- La representación de los giróscopos serán líneas suaves con la menor oscilación y ruido posibles.
- Líneas suaves en los outputs de los motores, (los motores serán más silenciosos y se calentarán menos). Los variadores y los motores se calentarán si las líneas

tienen muchas oscilaciones además la batería también se gastará más rápidamente en este escenario.

- Las líneas de los giróscopos se corresponderán con los comandos de RC adecuadamente y no oscilarán

Normalmente se usan dos gráficas: en la primera rcComand y Gyro y en la segunda PID_P, PID_I, PID_D, PID_sum. Se deben analizar estas gráficas para *Roll*, *Pitch* y *Yaw* individualmente.

La gráfica uno muestra cuando se modifica el input o se mueve el *stick* (rcComand) y como el giróscopo reacciona al stick (Gyro). En la segunda grafica se puede observar como los PIDs afectan al Gyro.

Las líneas de los PIDs deberían de ser aproximadamente así:

- P, idealmente la P no debería de causar mucho ruido en el Gyro. Es normal que la P oscile brevemente, pero no demasiado. Si la P tiene un valor demasiado alto el ruido aumentará y se introducirá también en el Gyro (con una frecuencia menor).
- D, idealmente la D debería seguir a la P pero ligeramente adelantada. También debería tener una magnitud similar, aunque la D será más ruidosa.
- I, para ajustar la I no es necesario observar Blackbox, lo mejor es mantener los valores de la I lo más bajos posible siempre y cuando el drone no se vea arrastrado por el viento o se desvíe de la trayectoria deseada o "derrape" en el aire. Si la sensación es como que el drone no tiene suficiente tracción en los giros probablemente haya que aumentar un poco la I.

Ejemplos de diagnóstico:

En la Figura 34 se puede observar claramente que la P es demasiado alta ya que las oscilaciones en la segunda gráfica son muy numerosas y esas oscilaciones llegan también al giróscopo en la gráfica superior.

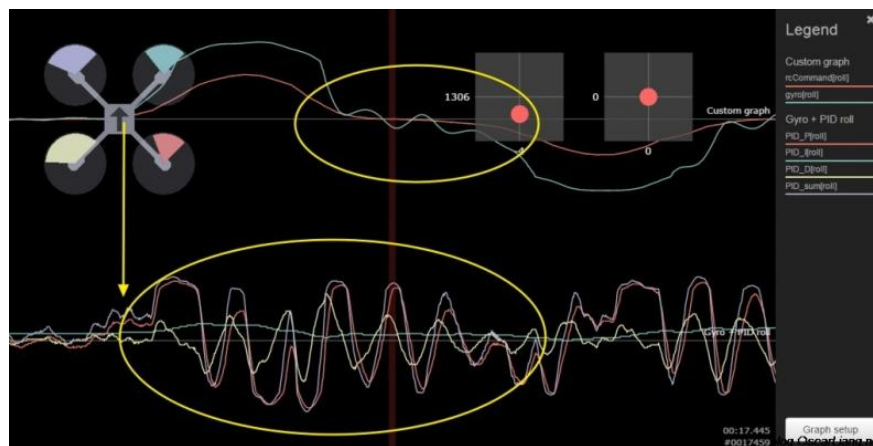


Figura 34. Blackbox, P demasiado alta.

Si se reduce la P se puede observar que las oscilaciones en la segunda gráfica disminuyen y desaparecen en la primera (ver Figura 35).

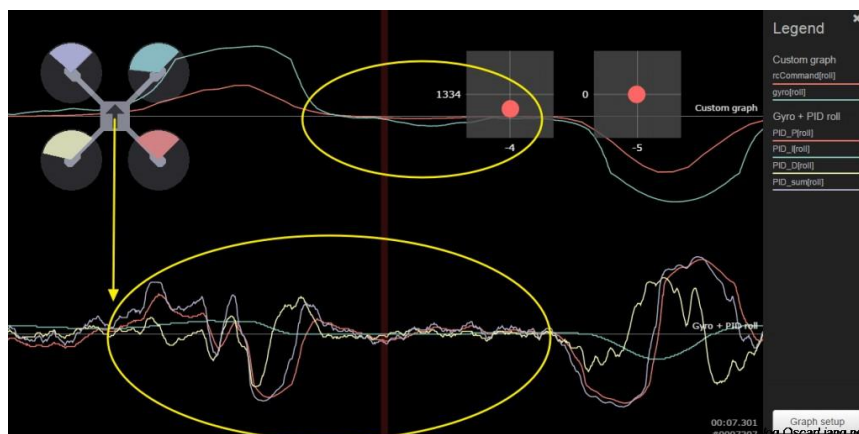


Figura 35. Blackbox, P adecuada.

Para ajustar la D en el Roll y el Pitch lo más adecuado es comprobar si se tienen oscilaciones en estos ejes después de un *Roll*, un *Flip* o un giro agresivo. En la Figura 36 podemos observar un ejemplo de una D demasiado baja:

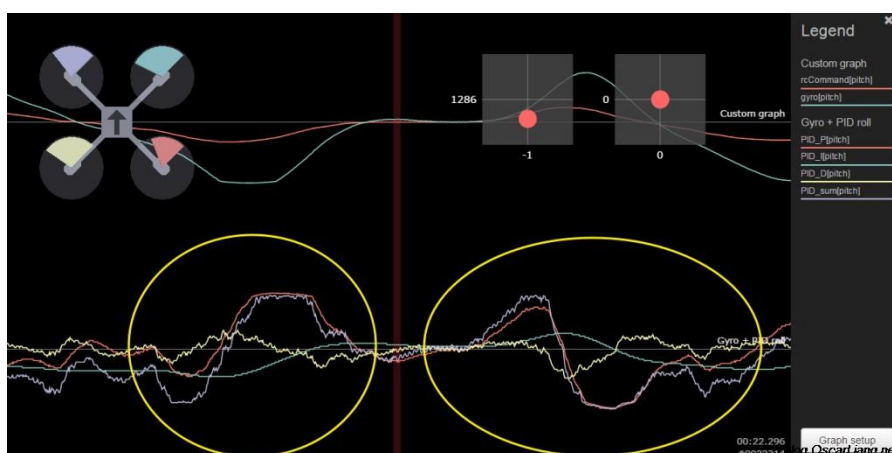


Figura 36. Blackbox, D (gráfica amarilla) demasiado baja.

Sin embargo, si aumentamos el valor de la D podemos comprobar cómo en la Figura 37 la magnitud de la gráfica de la D es más cercana a la magnitud de la gráfica de la P en rojo.

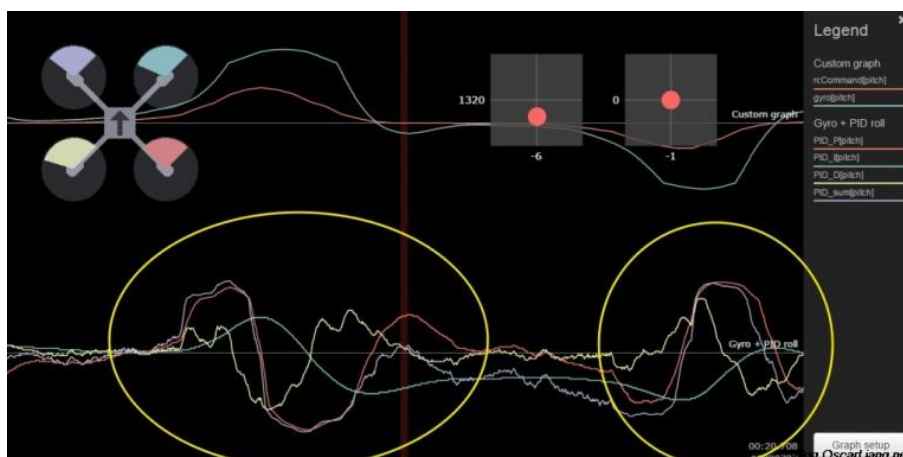


Figura 37. Blackbox, D adecuada.

7 Conclusiones y trabajo futuro

7.1 Conclusiones

En la construcción de un drone de competición hay que elegir cuidadosamente los componentes en función del uso que se le vaya a dar y las necesidades que se tengan. Aunque las habilidades del piloto juegan un papel muy importante en el desarrollo de una competición los componentes y ajustes del drone son también muy importantes para maximizar las prestaciones del mismo.

A la hora de elegir los componentes hay que tener en cuenta que todos los componentes están interrelacionados y que por tanto la elección de cada uno de los componentes condiciona la del resto. Por lo tanto, hay que calcular por ejemplo el tiempo de vuelo que se espera del drone que está relacionado con la capacidad de la batería, la elección de motor y hélice escogidos cuya eficiencia dependerá a su vez del peso total del drone. Uno de los factores más importantes para el buen funcionamiento del drone de carreras es minimizar el peso y la latencia escogiendo cuidadosamente los componentes y los protocolos de comunicación que se utilizarán.

Como estos drones se vuelan en zonas con abundantes obstáculos es importante que las antenas del video sean de polarización circular y que tengan el mayor "axial ratio" posible por eso mismo se han construido las antenas Pagoda.

Con los últimos avances realizados por Betaflight la calibración de los PIDs no es una tarea tan complicada, pero, aun así, si se desea maximizar el rendimiento del drone se debe optimizar este ajuste de los PIDs para lo cual el uso de BlackBox es prácticamente indispensable.

El factor limitante en los drones de carreras es sin duda alguna la batería, existen motores y variadores muy potentes y ligeros, y hélices muy agresivas pero la mayoría de las veces no se pueden escoger estos componentes porque la batería no tiene suficiente capacidad de descarga para alimentar estos motores al máximo de sus posibilidades o la duración de la misma es realmente corta. Además, el peso de las baterías es muy alto comparado con la del resto de componentes.

7.2 Trabajo futuro

Como trabajo futuro se proponen los siguientes objetivos:

- Realizar un análisis en profundidad de los distintos modelos y fabricantes de baterías con el fin de obtener baterías con mejores prestaciones. Se podrían realizar test de descarga a distintos amperajes y medir la caída de voltaje en cada caso. De esta forma se podría conseguir una medida real del C Rating y saber realmente las prestaciones de cada batería. También podríamos evaluar el rendimiento a largo plazo de las baterías en función del número de ciclos.

- Alternativas de sistemas de video digitales de buena calidad, baja latencia y antenas de buena durabilidad. En la actualidad existe un sistema de video digital que tiene una latencia bastante baja, Prosight HD³³, pero el precio aún sigue siendo mucho más alto que los sistemas actuales, y la antena que utiliza es muy delicada.
- Mejorar en general las prestaciones de los drones disminuyendo el peso de los componentes y aumentando su potencia y durabilidad.

³³<http://www.helipal.com/connex-prosight-hd-vision-pack.html>

8 Referencias

1. **Vera, J.M.** Cuál es la diferencia entre un drone, un UAV y un RPA. [En línea] 2013. [Citado el: 4 de 03 de 2017.] <http://www.onemagazine.es/noticia/14713/industria/cual-es-la-diferencia-entre-un-drone-un-uav-y-un-rpa.html>.
2. *Optimization of a modular drone delivery system.* **Lee, Jaihyun.** s.l. : IEEE Xplore, 2017.
3. *Drone-Assisted Disaster Management: Finding Victims via Infrared Camera and Lidar Sensor Fusion.* **S. Lee, D. Har and D. Kum.** Nadi, Fiji : s.n., 2016. 3rd Asia-Pacific World Congress on Computer Science and Engineering.
4. **dev, CTN.** Baseflight vs CleanFlight, facts & proofs. [En línea] 2015. [Citado el: 19 de 06 de 2017.] https://www.reddit.com/r/Multicopter/comments/2qabqh/baseflight_vs_cleanflight_facts_proofs_drama/.
5. **Liang, Oscar.** Raceflight y multishot. [En línea] 25 de 02 de 2016. [Citado el: 05 de 24 de 2017.] <https://oscarliang.com/raceflight-multishot/>.
6. —. Firmware de controladoras de vuelo. [En línea] 24 de 05 de 2017. [Citado el: 2 de 06 de 2017.] <https://oscarliang.com/mini-quad-fc-firmware/>.
7. —. Procesadores de controladoras de vuelo. [En línea] 2 de 06 de 2017. [Citado el: 10 de 06 de 2017.] <https://oscarliang.com/f1-f3-f4-flight-controller/>.
8. **Alex, (Unmanned Tech).** Manual de uso de OneShot. [En línea] 06 de 10 de 2015. [Citado el: 23 de 06 de 2017.] <http://www.dronetrest.com/t/blheli-oneshot-what-is-it-and-how-can-i-use-it/1310>.
9. **Liang, Oscar.** Protocolo Dshot para ESC. [En línea] 4 de 05 de 2017. [Citado el: 2017 de 06 de 8.] <https://oscarliang.com/dshot/>.
10. —. Protocolos de comunicacion del receptor. [En línea] 3 de 11 de 2016. [Citado el: 23 de 4 de 2017.] <https://oscarliang.com/pwm-ppm-sbus-dsm2-dsmx-sumd-difference/>.
11. **Tech), Alex (Unmanned.** SBUS vs PPM. [En línea] 2 de 10 de 2015. [Citado el: 6 de 06 de 2017.] <http://www.dronetrest.com/t/sbus-or-ppm-which-is-better/1356>.
12. **Bardwell, Joshua.** Video explicativo latencias protocolos receptor. [En línea] 28 de 12 de 2015. [Citado el: 2017 de 05 de 22.] <https://www.youtube.com/watch?v=iNpw-5R5exY>.
13. **Storm.** Loki s5 frame. [En línea] [Citado el: 2017 de 06 de 12.] <http://www.helipal.com/storm-racing-drone-loki-s5-stretched-arms-frame-set-5-4mm.html>.
14. **Liang, Oscar.** C Rating Bateria. [En línea] 4 de 02 de 2015. [Citado el: 15 de 05 de 2017.] <https://oscarliang.com/lipo-battery-c-rating/>.
15. **Daemon.** Raceband. [En línea] 17 de 01 de 2016. [Citado el: 2 de 06 de 2017.] <https://www.rcgroups.com/forums/showthread.php?2584406-What-is-raceband>.
16. **Baert, Maarten.** Antena Pagoda. [En línea] 13 de 06 de 2017. [Citado el: 2017 de 06 de 18.] <http://www.maartenbaert.be/quadcopters/antennas/pagoda-antenna/>.
17. **Oxygen.** DIVERSITY ¿CÓMO FUNCIONA? [En línea] 31 de 12 de 2015. [Citado el: 2017 de 06 de 4.] <https://www.xtremefpv.es/foro/viewtopic.php?t=43>.
18. **Bardwell, Joshua.** AIR MODE. [En línea] 1 de 04 de 2016. [Citado el: 4 de 05 de 2017.] <https://www.youtube.com/watch?v=d2nRrVENEYM>.
19. **DDC, Fernando.** PID para Cuadricópteros. [En línea] 2 de 02 de 2015. [Citado el: 8 de 05 de 2017.] <http://dronesdecarreras.com/pid-para-cuadricopteros-que-es/>.
20. **Liang, Oscar.** PID tuning with Blackbox. [En línea] 4 de 11 de 2015. [Citado el: 3 de 06 de 2017.] <https://oscarliang.com/pid-tuning-blackbox-basics/>.

Glosario

ACCST	Advanced Continuous Channel Shifting Technology
BEC	Battery Elimination Circuit
CCD	charge-coupled device
CMOS	complementary metal-oxide-semiconductor
DCL	Drone Champions League
DRL	Drone Racing League
ESC	Electronic Speed Control
FC	Flight Controller
FPU	Floatin Point Unit
FPV	First Person View
KISS	Keep It Super Simple
KV	Kilovoltio
OSD	On Screen Display
PCB	Printed Circuit Board
PDB	Power Distribution Board
PID	proportional–integral–derivative
PPM	Pulse Position Modulation
PWM	Pulse Width Modulation
RPA	remotely piloted aircraft
RX	Receptor
TVL	Television lines
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
VTX	Video Transmitter
WDR	Wide Dynamic Range

Anexo 1. Hélices

Hay numerosos tipos y marcas diferentes de hélices. Uno de los conceptos básicos en cuanto a las hélices es que al igual que dos motores giran en sentido horario y otros dos giran en sentido anti-horario, existen dos tipos de hélice dependiendo del sentido en el que giran. Generalmente son de plástico aunque hay diferentes tipos (policarbonato, fibra de nailon etc), por otro lado el tamaño y el grado de inclinación de la hélice viene indicado en una de las palas de la misma por unos números. Por ejemplo 5x4x3 o 5040 x3 quiere decir que es una hélice de 5 pulgadas de longitud, tiene un grado de inclinación de 4 (lo que en teoría indica que proporciona un recorrido de 4 pulgadas por revolución) y está formada por 3 palas. Según van aumentando cualquiera de estos números, tendremos más empuje pero por otro lado el motor también consumirá más amperios. A la hora de elegir hélice tenemos que tener muy en cuenta el torque de nuestro motor, pues puede darse el caso de que al poner una hélice demasiado agresiva además de consumir más no ganemos empuje puesto que el motor no tiene fuerza suficiente para hacer girar la hélice a revoluciones óptimas, por lo que tendríamos mejor rendimiento con una hélice menos agresiva.

El tamaño de hélice más común en drones de carreras es 5 pulgadas, y en la mayoría de las carreras el máximo permitido son 6 pulgadas.

El motivo por el cual la gente suele utilizar hélices de 5 pulgadas, aunque se permitan hélices de 6, es porque al ser hélices más pequeñas con menor peso, menor área y menor resistencia al aire tienen mayor aceleración. La mayoría de circuitos de carreras tienen numerosos giros zigzags, cambios de sentido etc, por lo que se suele preferir sacrificar algo de velocidad punta para ganar aceleración y maniobrabilidad.

Es por este mismo motivo por el cual se suelen utilizar hélices de tres palas en vez de dos. En general una hélice de dos palas tiene más velocidad punta que una de tres (siendo las palas iguales) porque tiene menor resistencia al aire y menor peso por lo que consigue mayores revoluciones y mayor velocidad. Sin embargo a bajas revoluciones una hélice de tres palas tiene más "agarre" o estabilidad en las curvas y cambios de sentido que una hélice de dos palas. En cualquier caso la elección de la hélice está muy ligada al motor que vayamos a usar y el tipo de circuito en el que vayamos a correr.

Anexo 2. OSD

OSD viene por sus siglas en ingles On Screen Display, y se trata de un dispositivo que superpone en la imagen de fpv ciertos datos importantes sobre el vuelo. Existen muchos pilotos de carreras que no utilizan OSD, es cierto que en una carrera probablemente no se tengan mucho en cuenta los datos y aunque por ejemplo el voltaje de la batería baje, no se va aterrizar hasta que se termine la carrera aunque puede que se baje el voltaje de la batería por debajo de los límites recomendados. Pero por otro lado en los entrenamientos o en vuelos acrobáticos el OSD nos proporciona datos muy útiles como el voltaje de la batería, los miliamperios consumidos o la calidad de la señal del control del drone entre otros parámetros. Hace tiempo todos los OSD eran una placa aislada que se soldaba entre la cámara y el transmisor de video. En la actualidad existen numerosos dispositivos que integran un OSD, principalmente controladoras de vuelo o PDBs, aunque también se pueden encontrar cámaras, transmisores de video que llevan integrado un OSD.

Anexo 3. Gafas y pantalla

Existen diferentes gafas y pantallas por las que recibir el video. Como ya se ha comentado hasta hace poco la única marca existente de gafas fpv de drones de carreras era Fat shark, actualmente sigue siendo la más importante y la opción más elegida entre los pilotos, pero empiezan a surgir algunas alternativas. Otra alternativa es visualizar la imagen en pantallas que en la mayoría de los casos suelen estar recubiertas de algún tipo de poliespan o plástico, para imitar la sensación de inmersión de las gafas. Normalmente las gafas suelen ser bastante más caras, pero es la opción más escogida por los pilotos porque se dispone de una pantalla individual para cada ojo, por lo que es más fácil enfocar y produce menor fatiga. En el caso de la pantalla, la imagen se ve mucho más grande, pero en muchos casos esta está algo deformada.

El modelo más importante de las gafas Fatshark es el Dominator aunque existen varias versiones con ciertas diferencias en el tamaño y resolución de las pantallas.

Sin embargo todos ellos disponen de la opción de un modulo receptor que se conecta directamente a las gafas, donde podemos elegir diferentes opciones con y sin Diversity, y aunque la mayoría de opciones de módulos receptores trabajan a 5,8 GHz existen algunas opciones de módulos receptores que trabajan a 1,3 GHz o 2,4 GHz.

Además disponen de una ranura para introducir una tarjeta micro SD para poder grabar el video del vuelo, lo cual es muy útil para poder visualizar el video posteriormente o poder usarlo en caso de un accidente lejos de la zona donde se encuentre el piloto para facilitar la búsqueda del aparato.

En este modelo también existe la opción introducir una pequeña plaquita, en un lateral de las gafas que funciona como Head Tracker, esto es una placa con un giróscopo integrado que permite reconocer los movimiento que el piloto realiza con su cabeza a fin de poder controlar con ellos unos servos que controlan el movimiento de la cámara. Aunque esta característica está más orientada a aviones o multicopios de mayor tamaño, y no se utiliza en drones de carreras.

Anexo 4. Tamaño motores brushless

En los motores brushless, aparte del KV siempre suele haber otro valor al lado y éste hace referencia al tamaño del motor. Por ejemplo los valores más comunes para motores pequeños son 1804, 1806, 2204... Las dos primeras cifras siempre harán referencia al diámetro del motor, más concretamente del diámetro de las bobinas (rotor) en mm, y el segundo valor a la altura del motor (del eje) en mm también.